



**Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia**

**RE-PROCESSAMENTO COMPARATIVO ENTRE OS
MODOS “FOCUS” E “GRADIX” PARA DADOS DE GPR
(RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO)**

MARTA TEIXEIRA DA COSTA

Monografia submetida ao curso de graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito obrigatório da disciplina de estágio de campo IV.

Área: Geologia de Engenharia e Ambiental

Orientadora: Profa. DSc. Paula Lucia Ferrucio da Rocha
Co-orientação: MSc. Glória da Silva Cezar

Setembro 2002

“Eu apenas queria dizer
a todo mundo que me gosta
que hoje eu me gosto muito mais
porque me entendo
muito mais também
E que a atitude
de recomeçar
É todo dia, toda hora
É se respeitar
na sua força e fé
Se olhar bem fundo
até o dedão do pé...”

Gonzaguinha.

Índice

	Página
Agradecimentos	vi
Resumo	vii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 – Apresentação do Estudo e Objetivos	1
1.2 - Caracterização da Área de Estudo	2
1.3 - Principais Métodos Geofísicos	7
Capítulo 2 - A técnica de Radar de Penetração no Solo (GPR)	12
2.1 – Fundamentos do GPR	12
2.1.1 - Principais parâmetros envolvidos na propagação de ondas eletromagnéticas em materiais geológicos	13
2.1.2 - Fatores que influenciam a operação do GPR	16
2.1.3 – Principais fatores que caracterizam os sistemas de GPR	17
2.2 – Equipamento e modos de aquisição de dados	20
2.2.1 – O sistema GPR	20
2.2.2 - Aquisição de Dados de GPR	22
2.3. - Forma de exibição de dados	26
Capítulo 3 – Processamento de Dados de GPR	30
3.1 – Principais Etapas do Processamento	30
3.2 – Processamento 3D	34
Capítulo 4 – Metodologia	35
4.1 - Introdução	35
4.2 – Processamento de Dados	37
4.3 - Determinação das Profundidades dos Refletores nas Seções de Radar	44
Capítulo 5 - Interpretação dos Dados e Resultados	46
5.1 - Introdução	46
5.2 - Interpretação dos Radargramas	46

Capítulo 6 – Considerações Finais e Conclusões	53
Capítulo 7- Referências Bibliográficas	54
Apêndice	57

Lista de Tabela

	Página
Tabela 2.1: Valores típicos dos parâmetros: constante dielétrica (K' – adimensional), condutividade elétrica (σ - mS/m), velocidade (V – m/ns) e atenuação (α - dB/m) para alguns materiais geológicos (Davis & Annan, 1989)	16

Lista de Figuras

	Página
Figura 1.1: Croqui representativo do arranjo estratigráfico dos materiais inconsolidados que compõem o substrato da área de estudo, ilustrando a posição em que os materiais arqueológicos normalmente ocorrem (Rocha et al., 2000a).	6
Figura 1.2: Nomograma relacionando a frequência de operação de alguns métodos eletromagnéticos com a condutividade do meio e a profundidade de alcance (Vogelsang, 1995).	11
Figura 2.1: Relação entre frequência, condutividade e atenuação. Observa-se que este último parâmetro aumenta consideravelmente com o aumento da frequência e da condutividade (Davis & Annan, 1989).	14
Figura 2.2: Variação da velocidade de propagação com a frequência, para diversos valores de condutividade (Davis & Annan, 1989). Está indicada a faixa de operação dos sistemas GPR.	15
Figura 2.3: Representação de pulsos eletromagnéticos correspondentes a dois eventos (feições subsuperficiais). (a) Eventos com tempos de trajetória bastante distintos, é possível distingui-los claramente. (b) Eventos com tempos sobrepondo-se. Se a diferença de tempo entre os eventos for menor que a metade da largura da envoltória do pulso (W), não é possível diferenciar os eventos (Annan, 1992).	19
Figura 2.4: Croqui esquemático representando sinteticamente os diversos componentes de um sistema GPR biestático e a propagação do pulso eletromagnético no subsolo, (Rittenhouse, in Smemoe, 2000).	21
Figura 2.5: Arranjo de reflexão, um dos diversos modos de aquisição de dados (Annan, 1992).	23

- Figura 2.6: Arranjo CMP, um dos modos de aquisição de dados que possibilita estimar a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio (Annan, 1992). 24
- Figura 2.7: Exemplo de seção de radar obtida com arranjo CMP (porção direita). Estão indicadas as posições das ondas diretas, no ar e na superfície do terreno, e da onda refletida. Também são apresentadas as expressões matemáticas dos tempos de propagação das três ondas, sendo x a separação entre as antenas, c a velocidade de propagação da onda no vácuo, v a velocidade de propagação da onda no meio, e d a distância até a superfície de reflexão (Annan, 1992). 24
- Figura 2.8: Arranjo transiluminação (Annan, 1992). 25
- Figura 2.9: Seção de radar (radargrama) onde observam-se formas hiperbólicas originadas pela aproximação e posterior afastamento de uma anomalia eletromagnética (Davis & Annan, 1989). 27
- Figura 2.10: Exemplos de modos de exibição de dados de GPR. (a) “Wiggle”, (b) amplitudes em escala de cinza e (c) amplitudes coloridas. As três imagens correspondem aos dados não processados do perfil 23 do sítio Morro Grande (Cezar, 2001). 28
- Figura 2.11: (a) Exemplo de bloco diagrama resultante de processamento 3D. (b) Demonstração das diferentes direções (“Slices”) em que os dados podem ser analisados, isto é, ao longo das linhas de aquisição, em direção ortogonal a estas ou ao longo de uma superfície formada pelo mesmo valor de tempo ou profundidade (Daniels, 2000). 29
- Figura 3.1: Exemplos de variações em dados de GPR ocasionadas pelo tipo de filtro. (a) Seção não processada. (b) Mesma seção anterior com filtro passa-baixa – realce de feições horizontais. (c) Mesma seção mostrada em (a) processada com filtro passa-alta – realce de feições inclinadas (Annan, 1992). 32
- Figura 3.2: Conceito de ganho variável com o tempo. Nos eixos horizontais está representado o tempo e os eixos verticais estão associados às amplitudes. Em (a) observa-se um sinal de radar com sua característica original. Em (b) está representada uma função que aumenta com o tempo e que pode ser aplicada como um ganho. Em (c) pode-se observar o sinal após a aplicação do ganho (Annan, 1992). 33
- Figura 3.3: Exemplo de mapas de amplitudes (fatias de tempo), resultante de processamento 3D de dados obtidos em um levantamento arqueológico. Os mapas correspondem às profundidades de 0-25 cm (a) e 25-50 cm (b). As áreas azuis denotam pouca ou nenhuma reflexão de radar, indicando material homogêneo. As áreas vermelha e verde são reflexões de maior amplitude, indicando a presença de material altamente contrastante com o meio. Em (b) observa-se uma forma retangular associada a uma construção subterrânea (Conyers, online). 34
- Figura 4.1: Croqui contendo a localização dos perfis de radar disponibilizados para este estudo (Cezar, 2001). 36
- Figura 4.2: Exemplo de imperfeições apresentadas pelo software Gradix[®], o qual aleatoriamente junta dois perfis processados como se fosse um só. Em (a) observa-se que os perfis 20 e 27 foram unidos pelo Gradix[®], o que é verificado comparando-se com os perfis 20 (b) e 27 (c) processados com o Focus[®] (Cezar, 2001). 37
- Figura 4.3: Exemplo de uma seção bruta, sem processamento. Observam-se várias feições

lineares na porção inferior, correspondentes a ruídos e também está indicada (elipse) uma forma associada a efeito externo (muro de alvenaria).	38
Figura 4.4: Efeito do Dewow na seção de radar anterior.	39
Figura 4.5: A parte superior apresenta maior definição após a aplicação do Declip.	40
Figura 4.6: Redução de ruídos com aplicação de filtro passa-banda trapezoidal.	41
Figura. 4.7: A aplicação do ganho constante incrementou as reflexões de maiores amplitudes de tal forma que ocasionou a eliminação dos ruídos de baixa amplitude.	42
Figura 4.8: Efeito do ganho de visualização no dado bruto. Há perda de definição em relação à seção anterior, a qual passou por todas as etapas de processamento antes da aplicação do ganho.	43
Figura. 4.9: Seção final, contendo todas as etapas de processamento, inclusive o Mix, que tornou as reflexões mais suaves.	44
Figura 5.1: Perfil 1 processado com os “softwares” Gradix® (a) e Focus® (b). Está indicada anomalia, que é melhor observada no segundo radargrama, mas que apresenta muitos ruídos.	47
Figura 5.2: Perfil 2 processado com os “softwares” Gradix® (a) e Focus® (b).	47
Figura 5.3: Perfil 5 processado com os “softwares” Gradix® (a) e Focus® (b).	47
Figura 5.4: Perfil 6 processado com os “softwares” Gradix® (a) e Focus® (b).	48
Figura 5.5: Perfil 7 processado com os “softwares” Gradix® (a) e Focus® (b).	48
Figura 5.6: Perfil 14. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.	49
Figura 5.7: Perfil 15. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações	49
Figura 5.8: Perfil 16. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.	49
Figura 5.9: Perfil 18. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.	50
Figura 5.10: Perfil 19. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.	50
Figura 5.11: Perfil 36. As feições mais significativas estão indicadas.	50
Figura 5.12: Perfil 41. As feições mais significativas estão indicadas.	51
Figura 5.13: Perfil 49. As feições mais significativas estão indicadas.	51
Figura 5.14: Perfil 50. As feições mais significativas estão indicadas.	51
Figura 5.15: Perfil 59. As feições mais significativas estão indicadas.	52
Figura 5.16: Perfil 62. As feições mais significativas estão indicadas.	52

Lista de Fotos

	Página
Foto 1.1: Exemplo de artefatos cerâmicos encontrados no Sítio Morro Grande: urna funerária associada a tigelas cerimoniais (Buarque, 1999).	3
Foto 2.1: Sistema GPR RAMAC (Malå Geoscience).	21

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, ao *Tempo*, que foi e continua sendo generoso comigo.

A memória de meus pais, que sempre confiaram em meus sonhos.

A meu marido, Sérgio, que sempre está ao meu lado, em todos os momentos.

A toda minha pequena família, de irmãos, cunhadas, sobrinhas e sobrinhos, que fazem a diferença.

Às minhas orientadoras e amigas, Paula Ferruccio da Rocha e Glória da Silva Cezar, que me deram toda orientação, e me fizeram acreditar que era possível!

A todos os Professores do Departamento de Geologia da UFRJ, novos e antigos, e alguns da Física também, que aprendi a gostar, durante o percurso.

A todos os meus amigos, que sempre me ajudaram de uma forma ou de outra, com seu apoio, suas críticas e sugestões: Aluisio (do DGEO), Andreia (minha amiga de todas as horas), Aracy, Claudia (minha amiga, mesmo distante), Claudinho (ex-Biblioteca Central CCMN, pelos livros e prazos), Lúcia (secretária Setor GeoEng), Osório (laboratório de via-úmida), Paulo, Marcelo (meu primeiro contato com o Gradix), Gleide, , Sidney (meu motorista favorito), Wal (DGEO), aos meus companheiros de alojamento, Ediomar, Eliabe, Fabricio, Hamiltom, Secel, Jaqueline, Welton (meus amigos de trabalho), Mário (meu chefe direto, que possibilitou meu “retorno” para a UFRJ),

É muito difícil agradecer a todos, sem esquecer, inevitavelmente de alguém, mas aos que esqueci, meu pedido de perdão e meus agradecimentos.

RE-PROCESSAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS DE GPR (RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO) VISANDO OBTER MAIOR RESOLUÇÃO DO RADARGRAMA.

MARTA TEIXEIRA DA COSTA

SETEMBRO 2002

ORIENTADORA: PAULA LUCIA FERRUCIO DA ROCHA

CO-ORIENTADORA: GLÓRIA DA SILVA CEZAR

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

RESUMO:

Em prospecção geofísica é muito importante o tratamento dos dados para uma melhor visualização do objeto de investigação. Neste trabalho foi realizado um estudo visando otimizar as etapas de um processamento para dados de GPR – radar de penetração no solo.

Os dados processados foram adquiridos em um estudo realizado em Araruama na região dos Lagos – RJ, que visava identificar artefatos arqueológicos da cultura Tupinanbá que estavam em subsuperfície. Além disto o trabalho original visava contribuir para a difusão do uso do GPR, na caracterização de alvos subterrâneos localizados em pequenas profundidades como vestígios arqueológicos.

O GPR é um método de prospecção geofísica baseado em ondas eletromagnéticas com alta frequência que apresenta crescente aplicabilidade em diversas áreas devido a sua praticidade e qualidade dos dados, cujo custo de aquisição é relativamente baixo.

O processamento dos dados é usado para retirar os efeitos causados por fontes externas (o próprio equipamento, construções locais, linhas de transmissão de energia, etc), para melhorar a interpretação. Com o processamento se obtém imagens mais definidas do que as obtidas a partir de dados tipicamente brutos.

O objetivo deste trabalho foi processar dados utilizando o GRADIX[®], “software” específico para processamento de dados de GPR. Estes dados originalmente foram processados com outro “software” utilizado para dados sísmicos, FOCUS[®]. Neste trabalho o novo processamento visava definir outros parâmetros que ajudassem a identificar melhor não apenas os objetos arqueológicos, mas também outras possíveis feições tais como tubulações. Foram testadas várias ferramentas definindo-se um fluxograma padrão para o processamento a partir do qual obteve-se os melhores resultados. O processamento consistiu basicamente na utilização de filtros para retirada de ruídos e aplicação de ganhos para realçar o sinal.

Os resultados são similares aos obtidos no primeiro processamento podendo-se, entretanto, destacar que as imagens ficaram mais nítidas, isto é, com uma significativa redução dos ruídos de fundo.

1 - Introdução

1.1 - Apresentação do Estudo e Objetivos

Os métodos geofísicos podem contribuir de forma ampla na pesquisa subterrânea, através de técnicas de prospecção indireta que representam redução no custo e também no tempo de aquisição de informações. Sendo as principais técnicas utilizadas a sísmica, magnetometria, gravimetria, eletrorresistividade e eletromagnetismo.

O radar de penetração no solo (GPR - "Ground Penetrating Radar") é um método eletromagnético que está em evidência devido a sua praticidade e previsibilidade, ao fornecer dados de subsuperfície com alta resolução. Para a identificação e posicionamento de feições subterrâneas através da técnica de GPR é necessária a existência de contraste nas propriedades elétricas do alvo investigado em relação ao meio no qual está inserido.

A técnica de GPR apresenta diversas aplicações, como por exemplo: determinação da espessura de camadas de gelo, localização de minas explosivas, identificação da geometria e o arranjo estrutural de leitos estratigráficos, identificação da dispersão de plumas de contaminantes, verificação da existência de fissuras em estruturas e localização de dutos metálicos, além de outras aplicações exemplificadas por Young & Peters Jr. (1996), Galli & Souza (1999), entre outros.

As aplicações de GPR para auxiliar a caracterização de sítios arqueológicos vem sendo difundida no Brasil e uma das pesquisas relativas ao tema foi realizada pelo Departamento de Geologia, da UFRJ em conjunto com uma equipe de arqueólogos do Museu Nacional/UFRJ em dois sítios Tupinambá localizados em Araruama. Os dados obtidos no referido estudo foram disponibilizados para a realização desta monografia.

O propósito desse trabalho é reprocessar os dados da pesquisa original, utilizando-se o “software” Gradix[®], desenvolvido especialmente para seções de radar, tendo em vista que no processamento original foi empregado um “software” tradicionalmente utilizado para dados sísmicos (Focus[®]). É importante ressaltar que nesse trabalho foram utilizados os dados não processados.

1.2 – Caracterização da Área de Estudo

Localização e Informações Arqueológicas

Os dados desta monografia foram obtidos no sítio arqueológico Morro Grande, implantado no bairro de mesmo nome, situado na cidade de Araruama - região dos lagos, litoral do Estado do Rio de Janeiro.

A Região dos Lagos apresenta uma grande riqueza arqueológica originada por populações pré-históricas que a habitavam antes da chegada dos europeus ao Brasil (Buarque, 1999). Na região podem ser encontrados vestígios arqueológicos pertencentes às diversas culturas que a povoava em diferentes espaços temporais. O registro mais antigo da região foi datado em 5520 ± 120 anos A.P*. (Kneip, 1980 in: Cezar, 2001) e se refere a um sítio arqueológico (Sambaqui do Forte) localizado em Cabo Frio, associado a povos pescadores-coletores-caçadores, os quais construíram os sambaquis.

O sítio Morro Grande está associado à subtradição Tupinambá, povos mais recentes (1.740 ± 90 anos AP - Buarque,1999), que os construtores de sambaqui, e caracterizavam-se principalmente pela confecção de peças cerâmicas utilitárias e cerimoniais.

Buarque (1999) relata que os Tupinambás eram grupos indígenas que confeccionavam peças cerâmicas para usos cotidianos (sem decoração) ou usos cerimoniais (com decoração plástica e/ou geométrica policrômica), inclusive para sepultamentos secundários, os quais eram realizados dentro ou fora da aldeia, preferencialmente em urnas tampadas. Esses artefatos cujas dimensões são de cerca de 0,70m de altura e até 2,00m de circunferência, ocorrendo em profundidade máxima de 1,10m, (Buarque e Martins, 1999) podem ser identificados pelo GPR. A foto 1.1 exemplifica o tipo de material que pode ser encontrado na área de estudo, isto é, uma urna funerária associada com tigelas cerâmicas (Buarque,1999)

* AP – antes do presente – (convencionou-se o ano de 1950 – como sendo o início do presente).



Foto 1.1: Exemplo de artefatos cerâmicos encontrados no Sítio Morro Grande: urna funerária associada a tigelas cerimoniais (Buarque, 1999).

Aspectos Geomorfológicos e Climáticos

Os dados do estudo foram obtidos numa área inserida em uma baixada originada por intenso tectonismo e posterior sedimentação marinha e deposição aluvionar e é delimitada pelo mar e por maciços cristalinos. A porção mais litorânea é constituída por restinga, formada por dois cordões arenosos separados pela lagoa de Araruama e diversas outras. As áreas mais continentais apresentam um relevo colinoso, originado a partir da intensa dissecação do embasamento cristalino (Lima, 1968).

A região é caracterizada por clima mesotérmico, com médias anuais de temperatura e pluviosidade de 22° e 1.100 mm, respectivamente (Buarque & Martins, 1999).

Considerações sobre a Geologia

Os resultados do levantamento com GPR estão diretamente relacionados com o material geológico de subsuperfície, como será mostrado na tabela 2.1, por isso é importante caracterizar os materiais do subsolo.

Com base no Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro - DNPM (Fonseca et al., 1998), a área de estudo está inserida no Complexo da Região dos Lagos, definido originalmente por Reis (1982, in: Fonseca, op. cit.).

O Complexo da Região dos Lagos, que é o embasamento das Unidades Búzios e Palmital, é constituído por rochas ortoderivadas, deformadas com orientação conspícua, ocorrendo em ordem de abundância: granitóides (de composição granítica, granodiorítica e tonalítica), migmatitos homogêneos e heterogêneos (sendo os heterogêneos com paleossoma anfíbolítico ou tonalítico e os homogêneos são granitóides orientados) além de migmatitos, presentes principalmente na localidade de Araruama. Fonseca et al. (1998) consideram a possibilidade de que os tipos heterogêneos tenham sofrido migmatização e anatexia em graus diferentes, originando os tipos mais homogêneos que formam o "Batólito de Araruama", descrito por Machado & Demange (1990), o qual constitui uma das principais unidades litoestruturais da Faixa Ribeira no Estado do Rio de Janeiro. Machado & Demange (op. cit.) identificaram duas fácies no Batólito de Araruama, distintas basicamente em função da granulometria: as suítes São Pedro da Aldeia e Araruama.

A suíte São Pedro da Aldeia caracteriza-se pela ocorrência de granitóides equi e inequigranulares, com granulometria predominante variando entre média à fina. Sua composição é basicamente granodiorítica à tonalítica. Apresenta estrutura bandada e maciça-orientada (Machado & Demange, op. cit.).

A suíte Araruama caracteriza-se principalmente por granitóides leucocráticos, cuja composição predominante é granodiorítica à granítica. A granulometria varia de média à grossa e, localmente, muito grossa (presença de lentes de feldspato alcalino com 2 a 4 cm de extensão). Apresenta estrutura foliada e pode-se observar em afloramentos, bandamento originado por níveis mais ricos em biotita, ou devido à ocorrência de leucogranitos com granulação mais fina ou, ainda, devido a pegmatitos foliados (Machado & Demange, op. cit.).

A área onde ocorre o Batólito de Araruama apresenta estrutura geológica complexa, em função de ter sofrido diversas fases deformacionais, as quais geraram dobras, desde centimétricas a quilométricas e estruturas com orientação predominantemente NW-SE, segundo os referidos autores.

Sobrepostos ao embasamento Pré-Cambriano, ocorrem sedimentos marinhos holocênicos e pleistocênicos (areias bem selecionadas, podendo, as de idade pleistocênica, apresentar coloração escura), sedimentos lagunares holocênicos (argilo-arenosos, ricos em matéria orgânica) e sedimentos continentais quaternários, holocênicos, que consistem em aluviões e coluviões (Martin et al., 1997).

Especificamente na área de estudo foram feitas sondagens a trado com a finalidade de caracterizar os materiais inconsolidados, visando auxiliar na interpretação dos dados de radar (Cezar, 2001). A partir das sondagens foi possível caracterizar de maneira visual e tátil os materiais constituintes do substrato (até a profundidade de 1,00 m). A caracterização granulométrica dos materiais de sub superfície permitiu estimar com maior segurança a velocidade do meio, possibilitando, calcular nas seções de radar, as profundidades dos refletores que poderiam indicar a presença de feições subterrâneas.

A análise dos materiais possibilitou identificar 5 níveis ou camadas. A descrição que é apresentada a seguir representa o arranjo em profundidade, da camada mais rasa para a mais profunda. Isto se deve ao enfoque puramente descritivo dos materiais do subsolo e também às características apresentadas por esses materiais, que são indicativas de que sua origem possivelmente é intempérica e não sedimentar.

O substrato é composto basicamente de areia na porção superior, e argila. Sendo que a camada arenosa apresenta variação granulométrica, de coloração e mineralógica, apresentando grãos de quartzo bem cristalizados e turmalina, que são indicativos de material de intemperismo. É nessa camada, de acordo com comunicação pessoal da pesquisadora Ângela Buarque (Cezar, 2001), que ocorre a maior parte do material arqueológico, tais como tigelas cerimoniais e utilitárias, além da tampa e da borda superior das urnas funerárias. Este fato possibilita obter bons resultados com GPR devido ao contraste de propriedades elétricas existente entre o material arenoso e a peça cerâmica.

A descrição do material obtido com as sondagens a trado associado com estudos arqueológicos permitiu construir um modelo de perfil para a subsuperfície rasa da área,

que é mostrado na figura 1.1 (Rocha et al., 2000a). Na referida figura, observa-se, por exemplo, a maneira como as urnas cerâmicas são encontradas em profundidade, e também é apresentada uma descrição detalhada do nível arenoso.

Figura 1.1: Croqui representativo do arranjo estratigráfico dos materiais inconsolidados que compõem o substrato da área de estudo, ilustrando a posição em que os materiais arqueológicos normalmente ocorrem (Rocha et al., 2000a).

Considerações Hidrogeológicas

O nível de água influencia os dados de radar, com isso é importante se obter informações sobre a sua profundidade, a fim de se interpretar as seções obtidas.

Dados de sondagens à percussão, realizadas pela empresa “Hidrogesp”, para o estudo da viabilidade da exploração de água subterrânea com fins de abastecimento no bairro Morro Grande, mostraram que profundidades de até 60 m não atingiram o nível de água.

1.3 – Principais Métodos Geofísicos

A Geofísica de prospecção caracteriza-se pelo desenvolvimento de técnicas indiretas e não destrutivas e apresenta crescente aplicabilidade para diversas situações onde se deseja realizar investigações preliminares, sem comprometer a integridade dos materiais analisados.

Magnetometria

Os levantamentos magnéticos fundamentam-se na existência de anomalias no campo geomagnético da Terra originadas pela magnetização de rochas ou objetos. Pode-se identificar dois tipos de magnetização de materiais: a indução produzida pelo campo magnético da Terra e a magnetização remanescente, ocasionada, por exemplo, por processos de aquecimento/resfriamento, que levam as “partículas magnéticas” do material a se orientarem de acordo com a direção do campo magnético da Terra naquele momento.

Na identificação de anomalias do campo magnético da Terra é fundamental determinar o campo total, no local onde será realizada a prospecção magnetométrica, levando em consideração as variações (periódica e não periódicas), como por exemplo, as tempestades magnéticas, variações diurnas e seculares. Portanto, nos levantamentos magnéticos normalmente empregam-se dois magnetômetros, um dos quais é utilizado para registrar as variações do campo geomagnético total e deve estar localizado distante de materiais que poderiam ocasionar distúrbios no campo. O outro magnetômetro é usado para a aquisição de dados.

Em geral é necessário subtrair das medidas obtidas no segundo magnetômetro os valores correspondentes ao do campo magnético total da área que foi registrado no primeiro. Com o resultado final, confecciona-se um mapa com as diferentes intensidades do campo magnético. Nos diversos pontos de coleta de dados, a partir de um algoritmo de interpolação de pontos, pode ser construído um mapa de isovalores magnéticos.

Gravimetria

As variações existentes no campo gravitacionais da Terra ocasionadas por heterogeneidades laterais na densidade dos materiais constituintes do subsolo, são a base dos levantamentos gravimétricos. Segundo Vogelsang (1995), os dados coletados nesse tipo de levantamento também são corrigidos a partir de valores de referência, uma vez que as leituras são influenciadas por fatores externos tais como: maré luni-solar, “drift” da mola do equipamento, correção de ar livre (que leva em conta a elevação em relação a um nível de referência), correção de Bouguer (que considera a massa específica do material existente entre a superfície e o nível de referência) e a correção do terreno, que desconta a influência da topografia no entorno do ponto de leitura.

Os levantamentos gravimétricos são realizados com gravímetros e os dados obtidos possibilitam a confecção de mapas (Ar Livre e Bouguer), que apresentam as diferenças horizontais na aceleração da gravidade, ou seja, as variações laterais na densidade dos materiais constituintes do subsolo. A interpretação da anomalia é feita a partir da elaboração de modelos de massa, que pudessem gerar a anomalia observada (Telford et al., 1990).

O levantamento gravimétrico para fins de identificação de alvos relativamente pequenos, requer uma malha bastante densa e que a aquisição de dados seja feita de forma muito acurada. Este levantamento é denominado microgravimétrico (Parasnis, 1997).

Eletrorresistividade

Esta técnica baseia-se na Lei de Ohm e consiste na aplicação de uma corrente contínua no terreno através de dois eletrodos metálicos (de corrente), os quais estão conectados a uma fonte elétrica. Outros dois eletrodos (de potencial) são também inseridos no terreno com a finalidade de registrar os valores de diferença de potencial no subsolo. Os eletrodos são deslocados na superfície do terreno e conforme aumenta-se a distância entre os eletrodos de corrente, profundidades maiores são atingidas. Os levantamentos podem ser feitos com vários arranjos dos eletrodos, sendo os mais comuns: Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo.

Os dados obtidos podem fornecer informações da resistividade dos materiais da subsuperfície, confeccionando-se mapas ou seções verticais. No caso de mapas, é mostrada a distribuição espacial das diferenças de condutividade, e nos perfis, a variação vertical e lateral dessa propriedade, possibilitando, assim, identificar materiais que apresentem anomalias de condutividade/resistividade.

Métodos Sísmicos

Os levantamentos sísmicos baseiam-se na aplicação de uma fonte de ondas acústicas no subsolo. Tais ondas sofrem reflexão e refração ao incidirem em interfaces correspondentes a um contraste de propriedades elásticas. A partir de um arranjo de receptores (geofones) em superfície, os sinais refletidos e refratados são detectados e armazenados juntamente com os seus tempos de trajetória. Estes dados são processados posteriormente, de modo a gerar uma imagem correspondente ao subsolo, possibilitando a identificação de estruturas subterrâneas. O método de sísmica de reflexão é o mais amplamente utilizado pela indústria de petróleo, por possibilitar obter informações de profundidades maiores. Já a sísmica de refração é utilizada para investigar alvos mais rasos, tais como para caracterização de problemas ambientais e de geotecnia.

Métodos Eletromagnéticos

Os métodos eletromagnéticos usam como princípio as leis de indução eletromagnética (Parasnis, 1997). A aplicação de um campo eletromagnético na superfície do terreno, através de uma bobina transmissora, gera um fluxo de corrente elétrica nos materiais condutores do subsolo. Este fluxo produz um campo secundário, que interage com o original, alterando suas características, ou seja, sua intensidade, fase e direção.

A detecção do novo campo (primário mais o secundário) é feita com o uso de uma bobina receptora (que em geral encontra-se separada da transmissora por distância fixa ou variável), a qual capta o resultado da interação entre os campos primário e secundário, ampliando-o e comparando-o com o campo original.

Entretanto, a detecção do alvo pode ser prejudicada pela interferência de materiais muito condutores, dispostos em nível mais rasos em relação ao alvo de interesse.

Os métodos eletromagnéticos são classificados em contínuos ou transientes (Telford et al., 1990). Os métodos contínuos (sistemas que operam no domínio da frequência, ou seja, transmitem e recebem determinada frequência em um dado tempo) podem operar com frequências relativamente baixas (100 Hz à 4 KHz). Métodos transientes operam no domínio do tempo e consistem na transmissão de pulsos transientes, com frequências mais elevadas (maiores que 10 KHz).

A profundidade de alcance dos métodos eletromagnéticos é função da frequência empregada. Vogelsang (1995) apresenta um nomograma (figura 1.2) correlacionando a profundidade de alcance com a frequência empregada e a condutividade do meio. Profundidades maiores são atingidas com frequências baixas. Porém, para transmiti-las é necessário empregar maior energia, o que compromete a portabilidade do sistema.

Entre as diversas técnicas englobadas nos métodos eletromagnéticos, destacam-se o VLF (“very low frequency”), que emprega frequências da ordem de 12 e 25 kHz, os métodos transientes, que empregam frequências entre 1 e 20 KHz e o GPR (“ground penetrating radar”) que será apresentado com detalhes no capítulo 2 e cujas frequências são da ordem de megahertz.

A diferença básica entre as referidas técnicas, a despeito dos resultados, é a profundidade investigada e a resolução dos dados obtidos, que aumenta com o aumento da frequência empregada. Portanto, existe uma relação inversamente proporcional entre profundidade de alcance e resolução dos dados, o que será discutido com mais detalhes no capítulo 2.

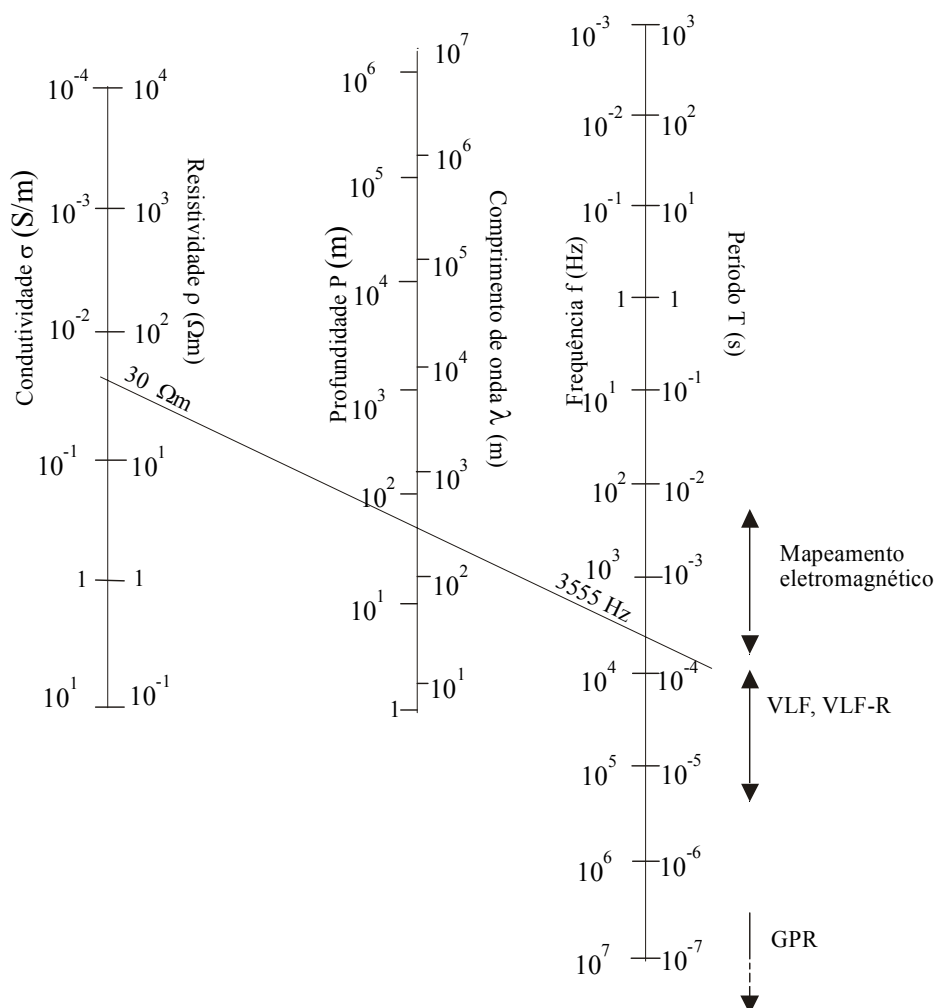


Figura 1.2: Nomograma relacionando a frequência de operação de alguns métodos eletromagnéticos com a condutividade do meio e a profundidade de alcance (Vogelsang, 1995).

O uso do GPR, dentre os demais métodos geofísicos, atualmente tem um grande destaque na prospecção de alvos rasos por oferecer alta resolução na identificação de feições de dimensões relativamente pequenas, considerando-se a extensão dos alvos geológicos. Uma outra vantagem da técnica de GPR é a possibilidade de processar os dados no campo, de modo que as anomalias podem ser identificadas rapidamente (Conyers, 1996)

2 - A Técnica de Radar de Penetração no Solo (GPR)

2.1 - Fundamentos do GPR

O radar de penetração no solo (GPR – “Ground Penetrating Radar” ou Georadar) é um método geofísico de prospecção que emprega ondas eletromagnéticas com altas frequências, entre 10 e 1500 MHz, as quais correspondem às ondas de rádio no espectro eletromagnético.

A identificação de feições subsuperficiais em registros de radar pode ser possível a partir das características do pulso eletromagnético refletido. Tais características estão relacionadas principalmente com as propriedades elétricas do alvo investigado e do meio no qual está inserido, ou seja, a constante dielétrica e a condutividade elétrica.

Desde o início do século idealizou-se a possibilidade de utilização de ondas de rádio com a finalidade de investigar a subsuperfície, sendo que as primeiras tentativas consistiram em definir a espessura de camadas de gelo em ambientes glaciais, e também localizar minas explosivas. No entanto, somente a partir da segunda metade do século XX (Parasnis, 1997), foram desenvolvidos sistemas de radar que permitiram realizar prospecções de modo eficiente, tanto no que concerne à maior confiabilidade dos dados, como ao processo de aquisição dos mesmos, que pôde ser incrementado a partir da maior portabilidade apresentada pelos novos equipamentos.

Os avanços que a técnica de GPR sofreu nas últimas décadas possibilitaram obter resultados com grande resolução e proporcionaram uma crescente aplicabilidade para diversos fins, tais como: definir espessura de solo sobre embasamento rochoso, prospecção mineral e de água subterrânea, identificação de plumas de contaminação e cavidades no subsolo, verificar as condições de leitos asfálticos e de estruturas de edificações, localizar tubulações enterradas e auxiliar na caracterização de sítios arqueológicos, a partir da identificação de construções e estruturas arqueológicas. Entretanto, como qualquer outra técnica geofísica, o GPR também apresenta limitações que podem torná-lo não aplicável em certas circunstâncias, como será discutido posteriormente.

A técnica de GPR fundamenta-se na propagação de ondas eletromagnéticas. Um campo eletromagnético ao se propagar interage com os materiais constituintes do meio, o que ocasiona o espalhamento e a atenuação do campo. O fenômeno de propagação de uma onda eletromagnética baseia-se nas equações de Maxwell as quais descrevem a

indução eletromagnética ocasionada por um campo elétrico no vácuo, e envolve uma série de parâmetros inerentes aos meios nos quais se dá a propagação, ou seja, as propriedades magnéticas (permeabilidade magnética) e, principalmente, as propriedades elétricas do meio (condutividade e permissividade dielétrica ou constante dielétrica).

As relações geométricas envolvidas no fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas são descritas a partir da Lei de Snell, isto é, uma onda incidente em uma interface que separa meios que apresentem propriedades eletromagnéticas contrastantes (descontinuidade geoelétrica) é parcialmente refletida e refratada. Este aspecto confere certa similaridade entre o método de GPR e o sísmico, sendo que este se baseia na propagação de ondas acústicas e as propriedades envolvidas são as elásticas.

2.1.1 - Principais parâmetros envolvidos na propagação de ondas eletromagnéticas em materiais geológicos

As propriedades eletromagnéticas do meio determinam a velocidade, a atenuação do sinal e a energia que é refletida nas interfaces onde elas variam (Davis & Annan, 1989).

O campo eletromagnético pode ser considerado como a interação de um campo magnético com um elétrico. A atuação desse último em um material produz um movimento de carga elétrica, ou seja, uma corrente elétrica que pode ser de dois tipos: corrente de condução e corrente de deslocamento, sendo que ambas são dissipadoras de energia do campo e ocorrem simultaneamente no material (Annan, 1992).

Constante dielétrica

Em certos materiais, a corrente de deslocamento relaciona-se com o campo elétrico através de um parâmetro de proporcionalidade, a permissividade dielétrica (ϵ). No entanto, utiliza-se a permissividade relativa ou constante dielétrica (K), que é a razão entre a permissividade dielétrica do material estudado e a do vácuo.

A constante dielétrica (K), é um parâmetro complexo que descreve as propriedades elétricas dos materiais submetidos a frequências elevadas e está diretamente relacionado com a velocidade com que as ondas eletromagnéticas se propagam.

Condutividade

A condutividade elétrica é um parâmetro de suma importância para o fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas. A interação do campo eletromagnético, com meios que apresentam condutividade elevada leva à perda de energia por atenuação, a qual aumenta intensamente para valores de frequência muito elevados, como mostra a figura 2.1 (Davis & Annan, 1989). Isto ocasiona uma limitação do emprego da técnica de GPR em meios muito condutivos, como, por exemplo, ambientes salinos, que por apresentar alta condutividade, a onda eletromagnética sofreria intensa atenuação e praticamente não se propagaria.

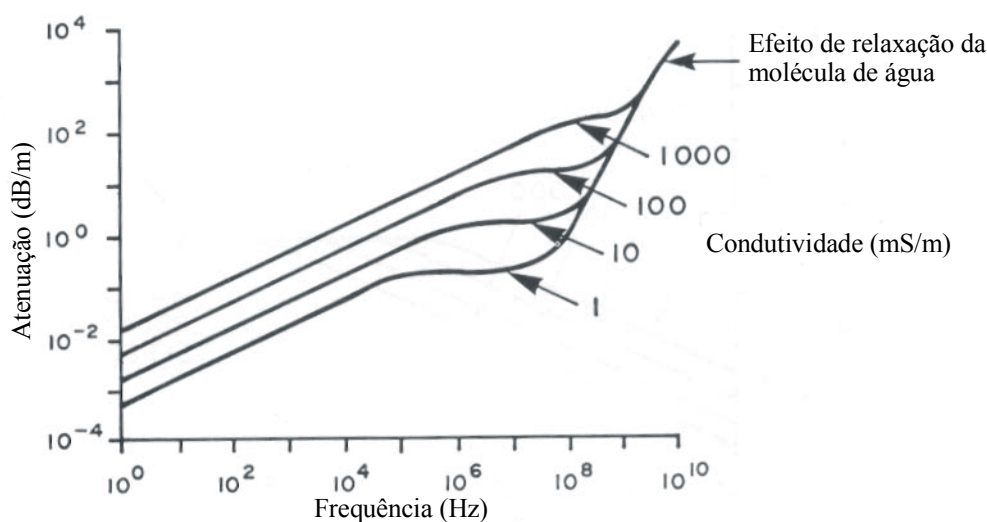


Figura 2.1: Relação entre frequência, condutividade e atenuação. Observa-se que este último parâmetro aumenta consideravelmente com o aumento da frequência e da condutividade (Davis & Annan, 1989).

Em frequências muito elevadas, a molécula de água presente no meio onde se dá a propagação, sofre variações intensas na polaridade, ocasionando o fenômeno de relaxação, o qual também gera grandes perdas de energia por atenuação (figuras 2.1 e 2.2). Conseqüentemente, uma onda eletromagnética com frequência muito alta (da ordem de GHz) propaga-se muito pouco ou até mesmo não se propaga, tendo em vista que os materiais geológicos, em geral, apresentam algum teor de umidade.

A variação da velocidade de propagação da onda eletromagnética em função da frequência e da condutividade é apresentada no gráfico da figura 2.2 (Davis & Annan, 1989). Observa-se que a velocidade é constante entre as frequências de 10 e 1000 MHz,

para condutividades menores que 100 mS/m (patamar delimitado pelas linhas tracejadas), o que indica ser este o intervalo ideal para operação do sistema GPR, evitando assim a dispersão de sinal ocasionada pela variação da velocidade com a frequência e também o fenômeno de relaxação da molécula de água, em frequências muito maiores que 1000 MHz.

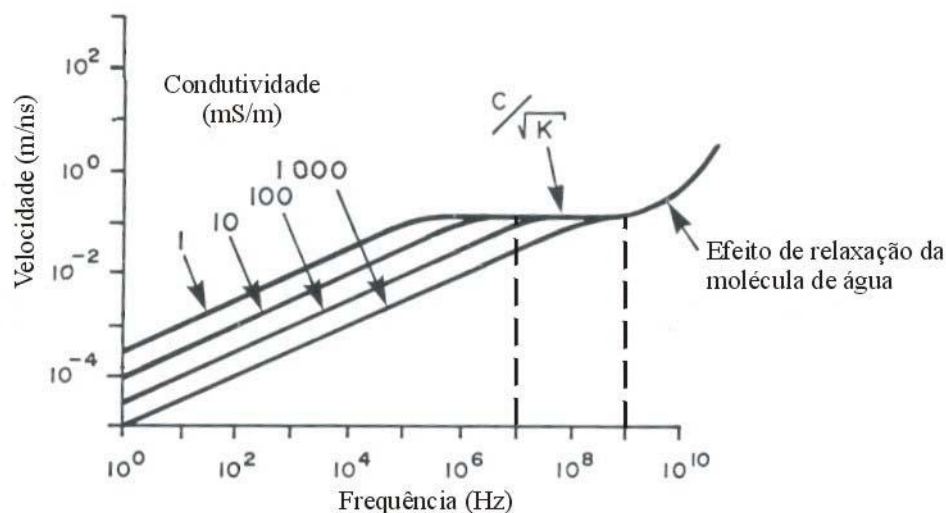


Figura 2.2: Variação da velocidade de propagação com a frequência, para diversos valores de condutividade (Davis & Annan, 1989). Está indicada a faixa de operação dos sistemas GPR.

As velocidades de propagação da onda eletromagnética em diversos meios podem ser estabelecidas diretamente, a partir da determinação da permissividade relativa do meio, o que pode ser feito no campo ou no laboratório (Turner et al., 1993), ou indiretamente, realizando levantamentos com o equipamento GPR utilizando-se certos arranjos, como será visto no item 2.2 (Annan, 1992).

A tabela 2.1 apresenta a variação dos parâmetros: constante dielétrica (parte real, K' - adimensional), condutividade (σ - mS/m), velocidade de propagação (V - m/ns) e atenuação (α - dB/m) para diversos materiais geológicos. Observa-se que os materiais mais condutivos são os que apresentam maior atenuação e que a velocidade de propagação da onda decresce com o aumento do valor da constante dielétrica. Com isso, pode-se ter uma idéia do desempenho da técnica de GPR para os referidos materiais.

Tabela 2.1: Valores típicos dos parâmetros: constante dielétrica (K' - adimensional), condutividade elétrica (σ - mS/m), velocidade (V - m/ns) e atenuação (α - dB/m) para alguns materiais geológicos (Davis & Annan, 1989).

Material	K'	σ' (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0.3	0
Água destilada	80	0.01	0.033	2×10^{-3}
Água doce	80	0.5	0.033	0.1
Água salgada	80	3×10^3	0.01	10^3
Areia seca	3-5	0.01	0.15	0.01
Areia saturada	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Calcário	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Folhelhos	5-15	1-100	0.09	1-100
Siltes	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilas	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Mineral salino seco	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Gelo	3-4	0.01	0.16	0.01

2.1.2 - Fatores que influenciam a operação do GPR

A discussão anterior possibilita estabelecer alguns dos parâmetros determinantes na aquisição de dados com o GPR.

Tipo de solo

Sedimentos finos, argilosos apresentam sua superfície eletricamente carregada devido à presença de íons, o que ocasiona a adsorção de moléculas de água, gerando um mecanismo de condutividade superficial (Mitchell, 1993). Este fato torna os sedimentos argilosos relativamente muito condutores (tabela 2.1) e, conseqüentemente, dissipadores de energia eletromagnética, isto é, não há propagação desse tipo de energia em camadas de argila muito espessas e os sinais presentes nos registros de radar, abaixo dessa camada, podem ser considerados como ruídos do sistema (Jol & Smith, 1995). No entanto, Ulriksen (1982, in Jol & Smith, 1995) atesta que, se a camada de argila for muito fina, parte da energia poderia atravessá-la.

Os sedimentos arenosos tendem a apresentar baixa condutividade (atenuação) possibilitando bons resultados no que concerne à profundidade de investigação.

Teor de Umidade

A presença de água nos materiais geológicos é um fator importante na definição das suas propriedades elétricas, pois as moléculas de água tendem a aumentar a constante dielétrica e a condutividade dos materiais, incrementando a atenuação do sinal.

Parâmetros do Equipamento

Os resultados obtidos nos levantamentos dependem de alguns parâmetros inerentes ao equipamento utilizado, tais como a frequência da antena, a resolução (comentado no item 2.1.3) e etc. O acoplamento da antena com a superfície do terreno também interfere na qualidade dos dados, pois para se evitar ou ao menos minimizar a perda de energia é necessário reduzir ao máximo os espaços existentes entre a antena e a superfície, isto é a antena deve estar mais próxima o possível da superfície do terreno (Herman, 1997).

2.1.3 – Principais fatores que caracterizam os sistemas de GPR

Segundo Davis & Annan (1989), os sistemas de radar podem ser caracterizados em função dos seguintes fatores:

Alcance

O alcance está associado ao desempenho do sistema de radar. Existem equações que permitem estabelecer o desempenho do sistema e assim estimar o alcance do sinal. No entanto, segundo Davis & Annan (op cit) a aplicabilidade do radar é melhor definida a partir de experimentos de campo, a despeito da pouca possibilidade de precisão em determinar as diversas incógnitas constituintes das referidas equações. A bibliografia registra ainda vários experimentos com o intuito de estabelecer a resposta do GPR (Smith & Jol, 1995).

Resolução

É a capacidade do sistema de radar distinguir dois pulsos eletromagnéticos, correspondentes a dois eventos que são registrados em tempos muito próximos, tendo em vista que o registro do radar mostra o tempo da trajetória realizada pelo sinal eletromagnético, a partir da antena transmissora até atingir a interface de reflexão e retornar à superfície.

Os pulsos de radar, em geral, são registrados como variação de amplitude versus tempo. Para que um evento possa ser individualizado em um registro de radar é necessário que a separação, em tempo, entre eles seja maior que a metade da largura da envoltória do pulso (W) emitido pelo radar como mostra a figura 2.3 (Annan, 1992). A referida figura apresenta pulsos representativos de dois eventos distintos, os quais podem ser claramente individualizados na primeira situação (a), pois as envoltórias referentes aos eventos A e B estão bem separadas no tempo, enquanto que no segundo caso (b) as envoltórias estão sobrepostas, o que dificulta a individualização dos eventos. Este fato mostra uma limitação do GPR para alvos compostos por um conjunto de objetos muito pequenos e muito próximos e também para níveis estratigráficos delgados, os quais não poderiam ser individualizados pela técnica. Vale ressaltar que os conceitos pequeno e próximo devem ser relacionados ao comprimento de onda usado na investigação.

A resolução está intimamente ligada à frequência do pulso eletromagnético (quanto maior for a frequência utilizada menor será o comprimento de onda e maior a resolução) e à profundidade de investigação, como será apresentado no item a seguir.

Um outro efeito que afeta diretamente a resolução das imagens de radar é conhecido como “transmitter blanking”, que consiste na saturação do receptor devido à chegada da onda direta (pulso emitido pela antena transmissora que se propaga no ar e na superfície do terreno e chega diretamente na antena receptora, sem sofrer reflexão). Essa saturação impede a detecção dos primeiros sinais refletidos, provenientes de feições muito rasas, cujo tempo de trajetória é igual ao da onda direta.

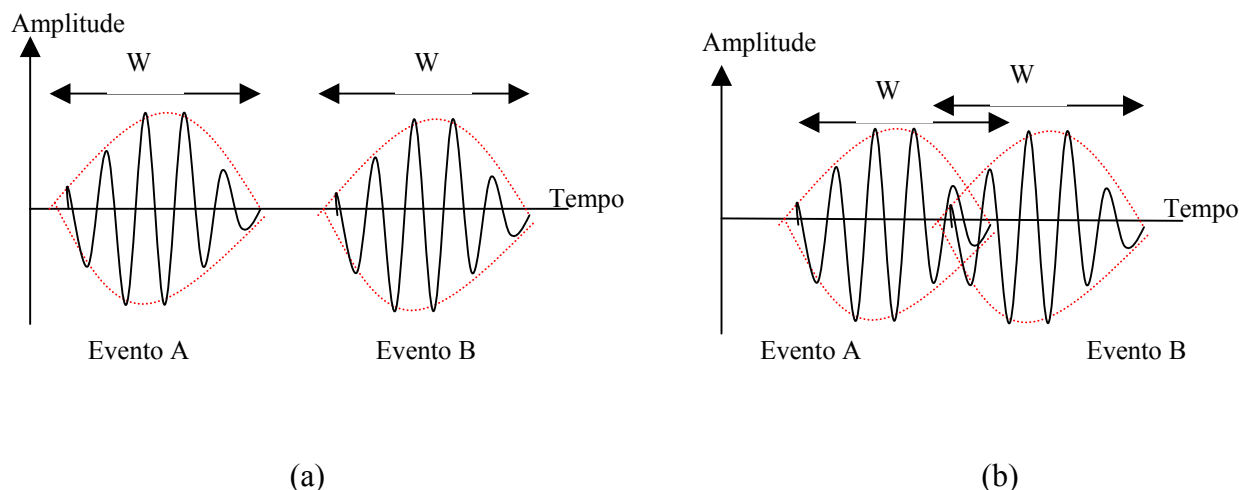


Figura 2.3: Representação de pulsos eletromagnéticos correspondentes a dois eventos (feições subsuperficiais). (a) Eventos com tempos de trajetória bastante distintos, é possível distingui-los claramente. (b) Eventos com tempos sobrepondo-se. Se a diferença de tempo entre os eventos for menor que a metade da largura da envoltória do pulso (W), não é possível diferenciar os eventos (Annan, 1992).

Relação Alcance-Resolução

A profundidade atingida por um sinal eletromagnético é definida pela sua interação com o meio. Verifica-se que o aumento da condutividade do meio e da frequência do sinal acarreta um aumento da atenuação (item 2.1.1) e, por conseguinte, o alcance do sinal é restrito a níveis muito rasos. Em geral, a atenuação é menor quando se empregam frequências baixas, que permitem, como citado anteriormente, atingir profundidades maiores, mas implicam em perda de resolução. No entanto, para se obter alta resolução é necessário que sejam utilizadas frequências elevadas. Este fato representa uma limitação da técnica de GPR, pois para se obter melhor resolução o alcance fica restrito às porções mais superficiais do meio investigado.

Com isso, antes de se decidir realizar levantamentos com o GPR, é fundamental conhecer as relações de dimensões e profundidades estimadas para o alvo, além das características eletromagnéticas do meio, a fim de preestabelecer se haverá condições de operacionalidade para o emprego da técnica.

Em geral, muitas aplicações do GPR requerem alcances relativamente grandes e, conseqüentemente, aceita-se pouca resolução espacial, que inclusive pode ser uma vantagem em ambientes onde ocorrem camadas muito finas ou diversas feições

pequenas, que não sejam de interesse. Para a caracterização deste tipo de alvo, é fundamental ter resoluções elevadas, ou seja, empregar frequências altas, cujo alcance é restrito, mas de um modo geral, esses alvos são rasos, como, por exemplo, os da pesquisa arqueológica.

Segundo Parasnis (1997), diversas experiências foram feitas em vários ambientes geológicos e mostraram que a frequência central de aproximadamente 100 MHz oferece, em geral, a melhor composição de alcance, resolução e portabilidade do sistema (pois quanto mais baixa for a frequência da antena, maior é a sua extensão).

2.2 – Equipamento e modos de aquisição de dados

2.2.1 – O sistema GPR

O sistema GPR típico consiste de uma unidade de controle, unidades de geração e captação do pulso eletromagnético, antenas transmissora e receptora e uma unidade para a visualização e processamentos preliminares dos dados, que em alguns modelos encontra-se embutida no próprio equipamento ou pode ser um “lap-top”. A unidade de controle gerencia a aquisição de dados, a partir de um “timing” e tem capacidade de armazená-los temporariamente. Existem sistemas de GPR que são biestáticos, isto é, utilizam um par de antenas, sendo uma transmissora e a outra receptora do pulso refletido. Também há sistemas monoestáticos, que apresentam uma única antena para a transmissão e recepção do pulso. Porém, de acordo com Parasnis (1997), a utilização de duas antenas separadas por uma pequena distância melhora significativamente a razão sinal / ruído. As antenas são ligadas à unidade de controle por cabos, que podem ser de fibra óptica, os quais reduzem os ruídos provenientes do equipamento.

A foto 2.1 mostra o sistema GPR RAMAC (MALÅ GeoScience) utilizado na aquisição dos dados disponibilizados para esta monografia e a figura 2.4 é um croqui representativo do sistema e da propagação da onda, onde estão identificados os diversos componentes.



Foto 2.1: Sistema GPR RAMAC (Malå Geoscience).

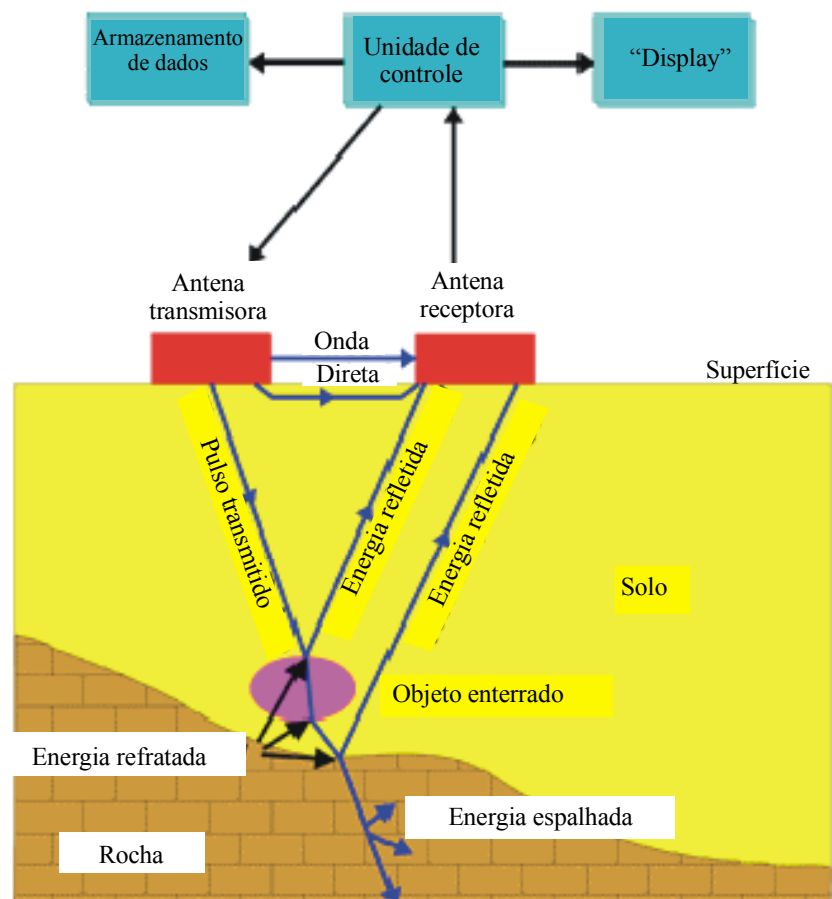


Figura 2.4: Croqui esquemático representando sinteticamente os diversos componentes de um sistema GPR biestático e a propagação do pulso eletromagnético no subsolo, (Rittenhouse, in Smemoe, 2000).

A unidade transmissora é um circuito elétrico que gera um pulso de curta duração e alta voltagem. Este é aplicado à antena transmissora, que é capaz de transformar esse sinal elétrico em uma onda de energia eletromagnética e transmiti-la para o meio. Os sinais refletidos retornam para a superfície e são captados pela antena receptora, passam para a unidade receptora, onde são transformados em voltagem ou corrente elétrica e, posteriormente, são amplificados, registrados e formatados para exibição pela unidade de controle (Parasnis, 1997).

As antenas do GPR são dipolos elétricos e consistem de tubos metálicos com diâmetro de até 20 mm, geralmente de alumínio revestido com níquel. Seu comprimento é função do caráter do pulso transmitido, ou seja, quanto mais largo for o pulso (frequências mais baixas), mais comprida deve ser a antena, o que reduz a portabilidade do sistema.

Na prática, a antena não emite um único pulso, mas sim uma sucessão de pulsos, com a mesma forma e duração, em intervalos definidos, tipicamente entre 50 e 2 μ s.

2.2.2 - Aquisição de Dados de GPR

Os sistemas GPR, em geral, empregam um “software” para a aquisição de dados, o qual envolve vários parâmetros que podem ser ajustados de acordo com as peculiaridades do levantamento, sendo os principais: frequência da onda transmitida, distância entre pontos de aquisição, frequência de amostragem e “time window”.

A frequência da antena deve ser definida em função das dimensões do alvo e da profundidade, como discutido anteriormente.

A frequência de amostragem refere-se à quantidade de vezes em que a antena receptora capta o pulso propagado e está relacionada com a frequência da onda. O parâmetro “time window” (janela de tempo) estabelece por quanto tempo um pulso transmitido será registrado e depende da frequência de amostragem.

A aquisição de dados pode ser feita basicamente de três modos, no que se refere aos arranjos da antena (Annan, 1992):

Reflexão ou “Common Offset”

Neste arranjo as antenas transmissora e receptora são deslocadas ao longo de um perfil, de modo que o espaçamento entre elas seja mantido constante (figura 2.5). Este arranjo é equivalente à reflexão sísmica.

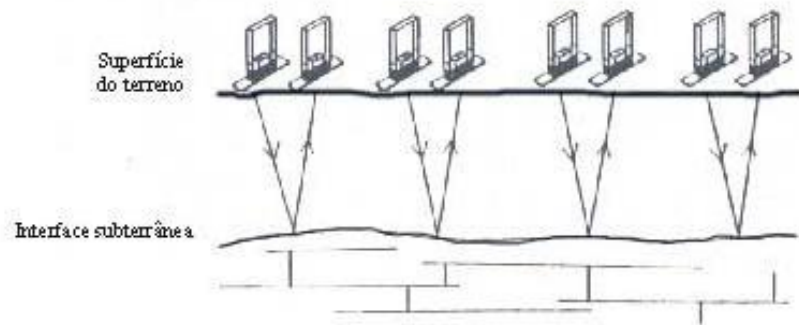


Figura 2.5: Arranjo de reflexão, um dos diversos modos de aquisição de dados (Annan, 1992).

“Common Mid Point” (CMP) e “Wide Angle Reflection and Refraction” (WARR)

Esses arranjos possibilitam estimar a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio, que é um parâmetro importante para a determinação da profundidade de refletores. No arranjo CMP, as antenas transmissora e receptora são deslocadas simetricamente a partir de um ponto central (figura 2.6). No arranjo WARR, a antena transmissora é mantida fixa e somente a receptora é deslocada ao longo do perfil. Em ambos os arranjos, determina-se o tempo de propagação da onda correspondente a cada posicionamento das antenas e, a partir dessa relação, é possível estimar as velocidades de propagação da onda no ar, na interface ar / solo e também da onda refletida nas discontinuidades eletromagnéticas de subsuperfície (figura 2.7).

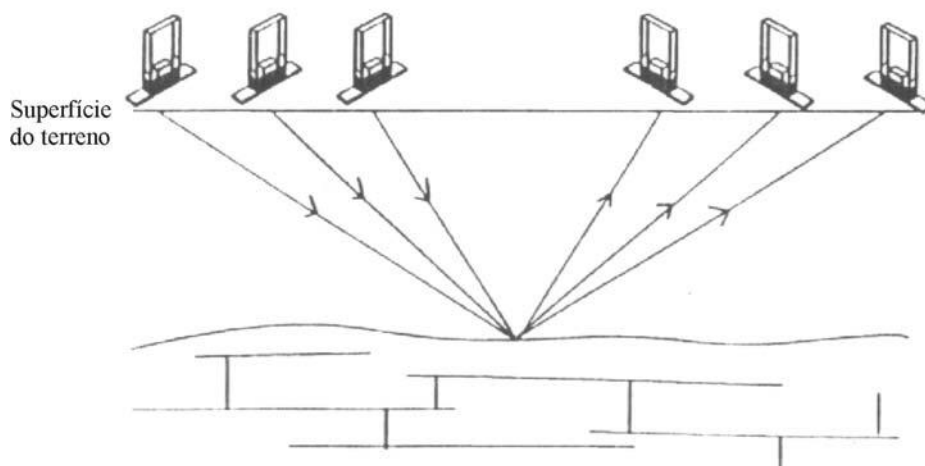


Figura 2.6: Arranjo CMP, um dos modos de aquisição de dados que possibilita estimar a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio (Annan, 1992).

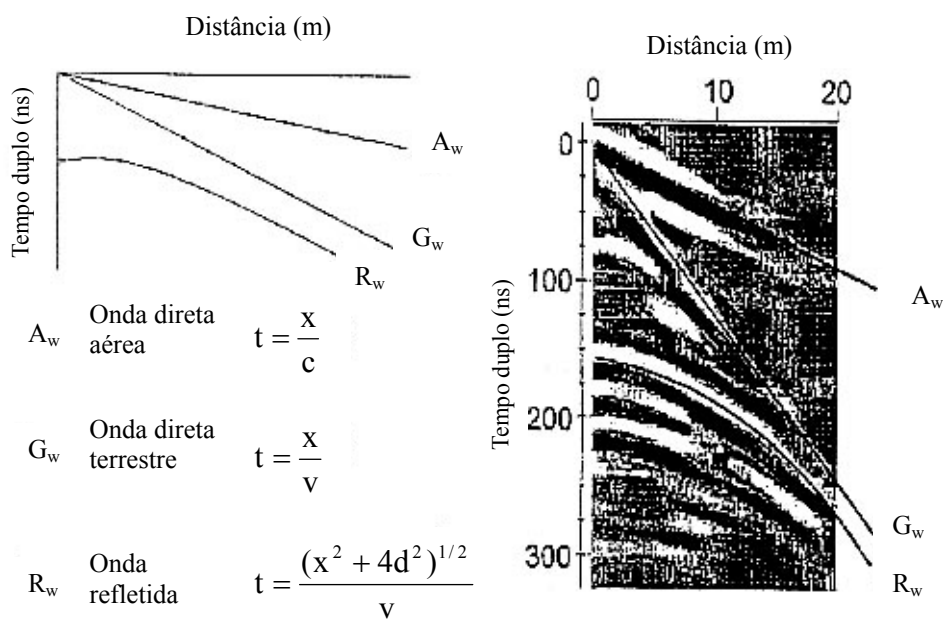


Figura 2.7: Exemplo de seção de radar obtida com arranjo CMP (porção direita). Estão indicadas as posições das ondas diretas, no ar e na superfície do terreno, e da onda refletida. Também são apresentadas as expressões matemáticas dos tempos de propagação das três ondas, sendo x a separação entre as antenas, c a velocidade de propagação da onda no vácuo, v a velocidade de propagação da onda no meio, e d a distância até a superfície de reflexão (Annan, 1992).

A realização de tais arranjos para alvos muito rasos, como em alguns sítios arqueológicos, é considerada desnecessária, pois as profundidades estimadas podem apresentar margens de erro consideráveis (Parasnis, 1997). A dificuldade de se obter valores confiáveis para a velocidade de propagação da onda eletromagnética nos materiais geológicos é discutida por Vaughan (1986), que sugere que sejam utilizados valores tabelados, como apresentados na tabela 2.1, nas situações onde a determinação da profundidade não necessita de muita acurácia.

Transiluminação

Este arranjo é utilizado para a caracterização de feições muito pequenas, como, por exemplo, na verificação de fissuras em pilares. A antena receptora é mantida fixa enquanto a transmissora é deslocada em posição simetricamente oposta, como mostra a figura 2.8.

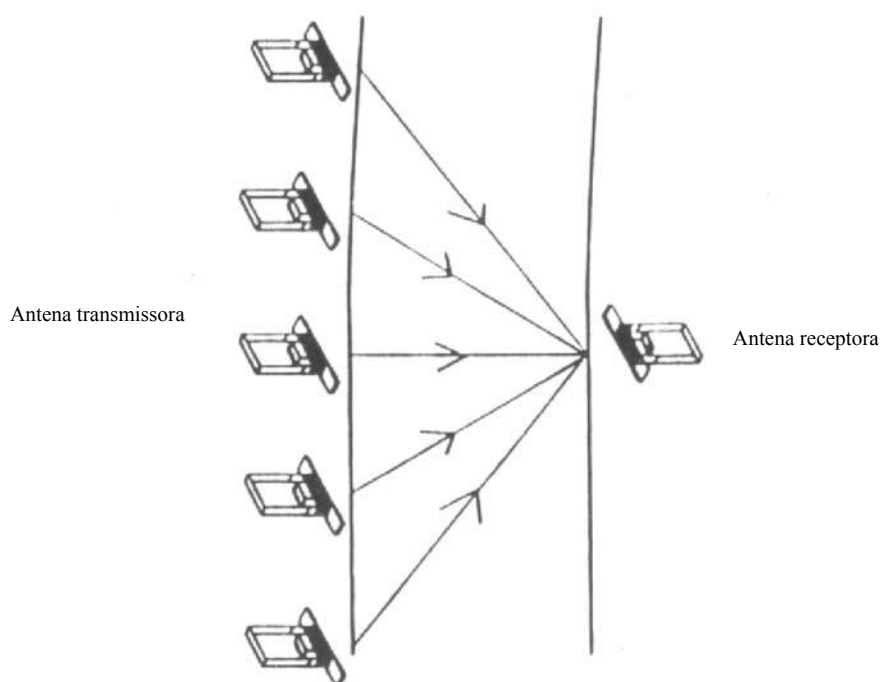


Figura 2.8: Arranjo transiluminação (Annan, 1992).

Além dos arranjos citados, existe também a técnica de radar de poço que, de acordo com Wänstedt et al. (2000), é um caso especial de GPR convencional, porém com várias feições que o distingue do equipamento utilizado em superfície, ou seja, é feito um furo de sondagem e as antenas são dispostas no seu interior, em contato com a parede do furo, onde são rebaixadas progressivamente. Uma característica importante da técnica é a possibilidade de posicionar as antenas muito próximas do objeto de investigação e, assim, obtêm-se respostas mais precisas do alvo. Uma variação da técnica é a disposição das antenas transmissora e receptora em furos diferentes, o que permite realizar medições “cross-hole”, as quais complementam os dados obtidos com um único furo.

2.3 – Forma de Exibição de Dados

Os dados de radar normalmente são apresentados como uma seção (radargrama), onde o eixo horizontal representa a extensão do terreno e mostra a variação lateral da intensidade do sinal. O eixo vertical, em geral, apresenta o tempo duplo da trajetória da onda, que é o tempo despendido para que a onda seja transmitida, sofra reflexão e retorne à superfície. Também podem-se representar, no eixo vertical, as profundidades dos refletores, se a velocidade de propagação da onda no meio for conhecida.

É comum observar feições hiperbólicas nos radargramas (como mostra a figura 2.9), que são associadas a pulsos refletidos em tempos progressivamente menores, ao longo do perfil, até uma determinada posição, quando, então, passam a ter valores crescentes. Estes registros correspondem à aproximação e posterior afastamento de uma “anomalia” eletromagnética, que pode não ser subterrânea.

A apresentação dos dados (“display”) é produzida a partir da “plotagem” de traços sucessivos ao longo de um perfil e pode ser feita de várias maneiras.

Em um tipo de “display” os traços são plotados de modo a representar suas variações de amplitude (“wiggles”), como mostram as figuras 2.9 e 2.10a.

Um outro tipo de representação consiste em uma imagem produzida de modo que as diferentes amplitudes registradas são associadas a tons de cinza ou cores (figura 2.10 b e c). No caso, há uma convenção de que a cor vermelha corresponde às amplitudes positivas, enquanto as negativas tendem a tons de azul. Vale ressaltar que existem outras possibilidades de apresentação de dados (Parasnis, 1997).

Nessa pesquisa, optou-se por representar os dados com amplitudes em escala de tons de cinza, por melhor possibilitar a visualização das feições, como pode-se constatar ao comparar os radargramas apresentados na figura 2.10, que corresponde ao perfil 23, não processado (Cezar, 2001).

Podem-se também criar imagens tridimensionais (figura 2.11, Daniels, 2000) a partir de um levantamento de campo realizado de maneira detalhada, isto é, com as linhas de aquisição de dados apresentando pouca separação e com intervalo de coleta de dados muito pequeno. Uma grande vantagem das imagens tridimensionais é a possibilidade de uma melhor visualização dos dados, a partir da interpolação de pontos. As imagens 3D também permitem realizar “cortes” verticais e horizontais (“time slices”), como mostra a referida figura. A partir desses “cortes” podem-se comparar anomalias nas amplitudes que ocorrem em determinado intervalo de tempo (Basile et al., 2000).

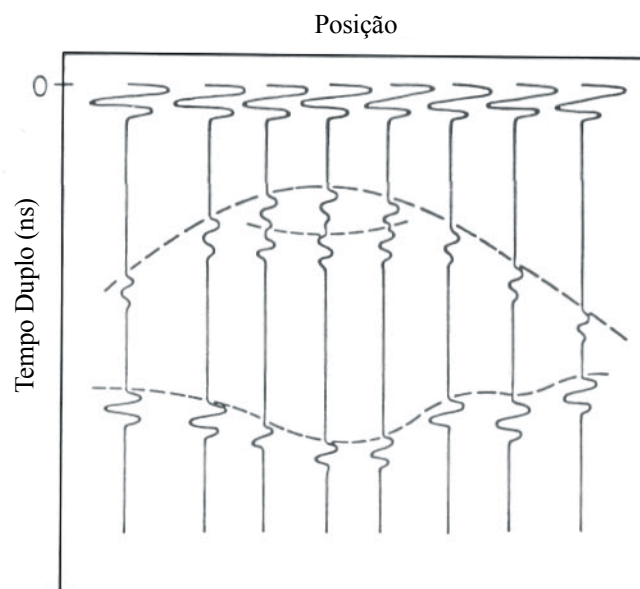


Figura 2.9: Seção de radar (radargrama) onde observam-se formas hiperbólicas originadas pela aproximação e posterior afastamento de uma anomalia eletromagnética (Davis & Annan, 1989).

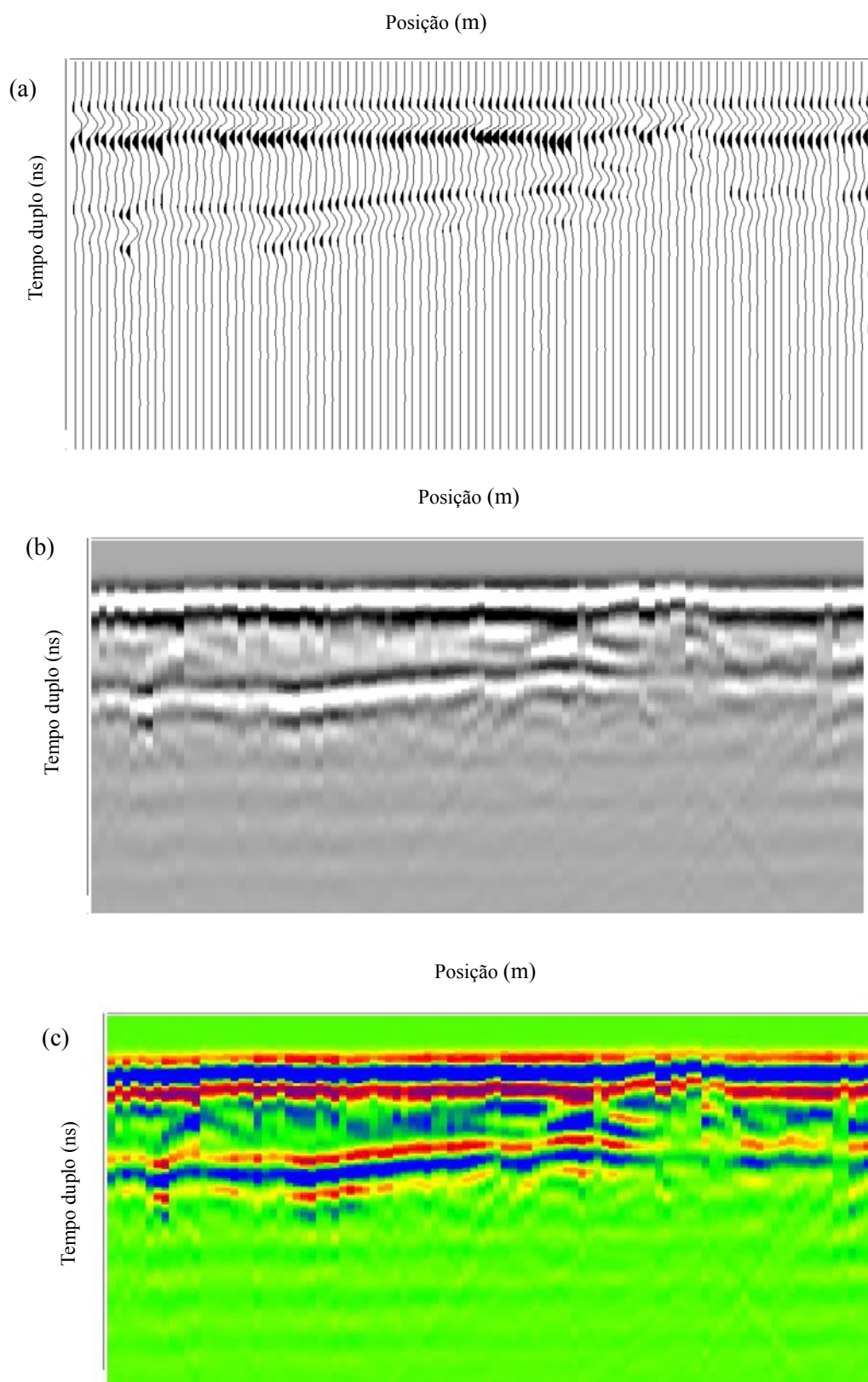


Figura 2.10: Exemplos de modos de exibição de dados de GPR. (a) “Wiggle”, (b) amplitudes em escala de cinza e (c) amplitudes coloridas. As três imagens correspondem aos dados não processados do perfil 23 do sítio Morro Grande (Cezar, 2001).

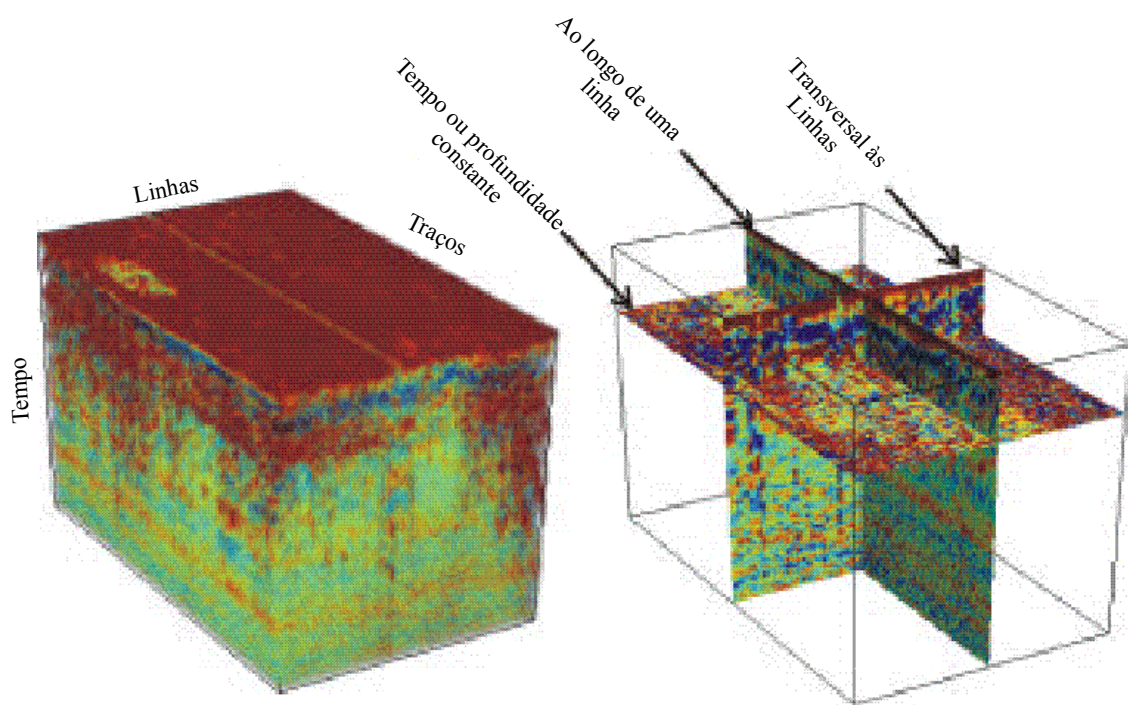


Figura 2.11: (a) Exemplo de bloco diagrama resultante de processamento 3D. (b) Demonstração das diferentes direções (“Slices”) em que os dados podem ser analisados, isto é, ao longo das linhas de aquisição, em direção ortogonal a estas ou ao longo de uma superfície formada pelo mesmo valor de tempo ou profundidade (Daniels, 2000).

Uma outra forma de apresentação de dados de radar é quadridimensional (4D), que reflete a maneira como o dado foi coletado. Birken & Versteeg (2000) descrevem a técnica como tendo princípio similar ao da sísmica 4D, isto é, um mesmo levantamento é realizado repetidamente, em momentos diferentes a fim de verificar a existência de alterações nas fases fluídas, provavelmente existentes em subsuperfície. Este tipo de levantamento é realizado especialmente em investigações envolvendo contaminantes. No entanto, este tipo de aquisição é bastante complexo, basicamente devido à dificuldade de realizar novos levantamentos exatamente nos mesmos perfis, e também existem complicações na fase de processamento e visualização dos dados.

3 - Processamento de Dados de GPR

Os dados de GPR podem ser influenciados por diversos fatores durante a aquisição. Dentre esses fatores, destacam-se: a atenuação do sinal (devido ao aumento da profundidade ou às características do meio), a interferência ocasionada por feições localizadas em superfície, a proximidade de fontes de energia eletromagnética e a influência do próprio equipamento. Os efeitos causados pelos referidos fatores podem deteriorar a qualidade dos dados, sendo necessário processá-los.

O processamento consiste de um conjunto de etapas realizadas por “softwares”, os quais oferecem diversas possibilidades de tratamento de dados e são capazes de minimizar os efeitos ocasionados pelos fatores anteriormente citados, ou seja, a partir do processamento é possível eliminar ou, ao menos, reduzir as influências de estruturas superficiais nas seções de radar e, também realçar aquelas de origem subterrânea, que são o alvo do estudo. No entanto, eventualmente, pode não haver necessidade de se realizar o processamento dos dados.

A técnica de GPR, como discutido no capítulo 2, em princípio é similar à sísmica de reflexão (Davis & Annan, 1989) e a experiência tem mostrado que várias etapas do processamento de dados sísmicos podem ser aplicadas em dados de radar (Annan, 1992, Rocha et al., 2000a, Cezar, 2001).

3.1 - Principais Etapas de Processamento

As etapas do processamento são divididas nas categorias básica e avançada e são discutidas por Annan (1992). O processamento básico tem caráter preliminar e, em certas circunstâncias pode ser aplicado automaticamente durante a aquisição, de modo que a visualização dos dados em tempo real apresente o efeito desse processamento. O processamento avançado ocasiona intensa alteração no dado original. Essa pesquisa não intenta discutir as diversas etapas de processamento, mas apenas apresentar, brevemente, as fases aplicadas nesse estudo.

Dewow

O efeito “wow” ocasiona a saturação dos componentes eletrônicos de registro do equipamento devido às grandes amplitudes das ondas diretas. Apresenta-se como um ruído de baixa frequência associado a fenômenos de indução eletromagnética ou a influência do equipamento. A remoção desse efeito (“dewow”) em geral, é a primeira etapa do processamento, a qual permite visualizar o sinal existente ‘atrás dele’(manual software Gradix, 1996).

Declip

A função “declip” é utilizada para restaurar, por interpolação, a forma das primeiras ondas refletidas. Tais ondas sofrem um truncamento devido às amplitudes das ondas aérea e direta serem muito maiores do que a energia refletida. Como as ondas “truncadas” têm a aparência de ondas quadradas (e por isso são artificialmente enriquecidas em altas frequências) é recomendado que a função declip seja aplicada antes de qualquer filtragem (manual software Gradix, 1996).

Filtro

Outra fase de processamento comumente utilizada é a aplicação de filtros, os quais possibilitam retirar dos dados as componentes de frequência indesejadas (ruídos), melhorando significativamente a relação sinal / ruído. Existem diversos filtros, sendo que a escolha do tipo a ser empregado depende das características do meio onde os dados foram adquiridos, ou seja, é necessário conhecer preliminarmente o subsolo para que a filtragem realce as feições que se pretende encontrar. Isto pode ser observado na figura 3.1 (Annan, 1992), que apresenta uma seção não processada (a), a mesma seção sob efeito de um filtro passa-baixa, o qual mantém as frequências baixas, realçando as feições horizontais, contínuas (b) e também com um filtro passa-alta, que mantém as frequências altas, ressaltando as feições inclinadas, localizadas (c).

Nos dados deste trabalho foi empregado o filtro passa-banda trapezoidal, que se mostrou o mais adequado. Este filtro permite estabelecer quatro valores de frequências, de modo que são mantidos apenas os componentes de frequência pertencentes ao intervalo estabelecido.

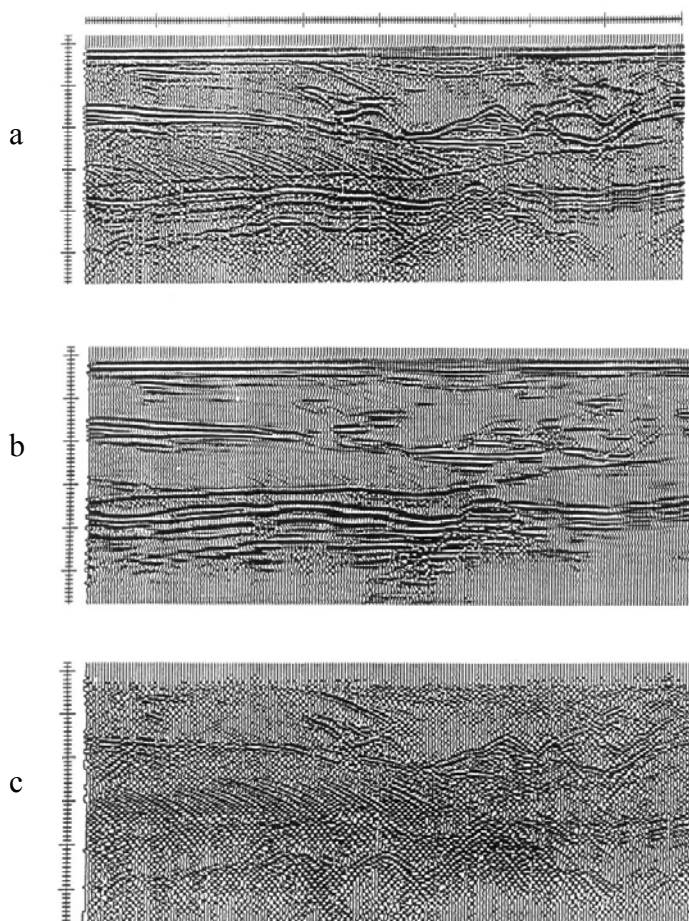


Figura 3.1: Exemplos de variações em dados de GPR ocasionadas pelo tipo de filtro. (a) Seção não processada. (b) Mesma seção anterior com filtro passa-baixa – realce de feições horizontais. (c) Mesma seção mostrada em (a) processada com filtro passa-alta –realce de feições inclinadas (Annan, 1992).

Ganho

Os sinais de radar ao se propagar no subsolo são atenuados muito rapidamente. A amplitude dos sinais provenientes de grandes profundidades é muito menor e a visualização dessa informação na presença de sinais de profundidades menores é muito difícil. Quando a amplitude de visualização é adequada para sinais de eventos rasos, pode ser invisível ou indiscernível para profundidades maiores. Por isso, há a necessidade de equalizar amplitudes ou aplicar algum tipo de função de ganho com o tempo que compense a rápida queda nos sinais de radar em profundidades maiores (Annan, 1992).

Há vários tipos de função de ganho que podem ser aplicadas para compensar a rápida queda do sinal do radar, sendo os mais comumente utilizados o ganho de compensação esférica e exponencial (SEC), o controle automático de ganho (AGC) e também o ganho constante.

O SEC consiste na aplicação de um ganho que aumenta com o tempo (como mostra a figura 3.2, Annan, 1992).

O AGC tenta equalizar as amplitudes ao longo do traço, de modo que nas áreas de sinal fraco o ganho é grande e em áreas de sinal mais forte o ganho é pequeno. O ganho AGC fornece bons resultados no monitoramento da continuidade dos refletores, mas oblitera todas as informações de amplitude.

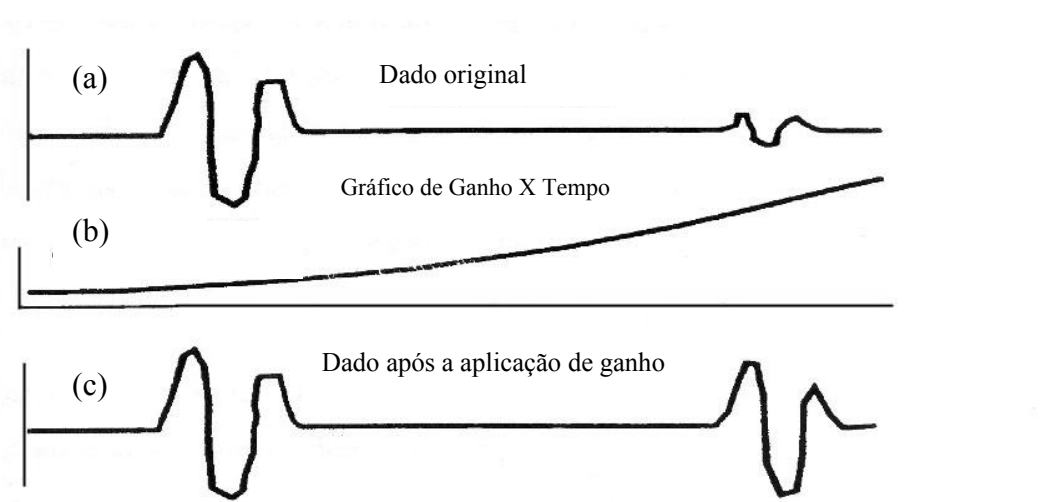


Figura 3.2: Conceito de ganho variável com o tempo. Nos eixos horizontais está representado o tempo e os eixos verticais estão associados às amplitudes. Em (a) observa-se um sinal de radar com sua característica original. Em (b) está representada uma função que aumenta com o tempo e que pode ser aplicada como um ganho. Em (c) pode-se observar o sinal após a aplicação do ganho (Annan, 1992).

Mix

A função “mix” realça o sinal coerente e atenua os ruídos aleatórios, suavizando a seção de radar, porém ocasionando perda de resolução horizontal.

3.2 - Processamento 3D

Um modo sofisticado de manipular dados de GPR é pela análise de mapas de amplitudes obtidos a partir de processamento 3D (item 2.3). A análise da localização tridimensional das amplitudes de ondas refletidas é importante por ser indicadora de mudanças do subsolo potencialmente significativas. Se as mudanças na amplitude podem ser relacionadas com feições subterrâneas importantes, a localização dessas mudanças pode ser usada para reconstruir a subsuperfície, como mostra a figura 3.3 (Conyers – online).

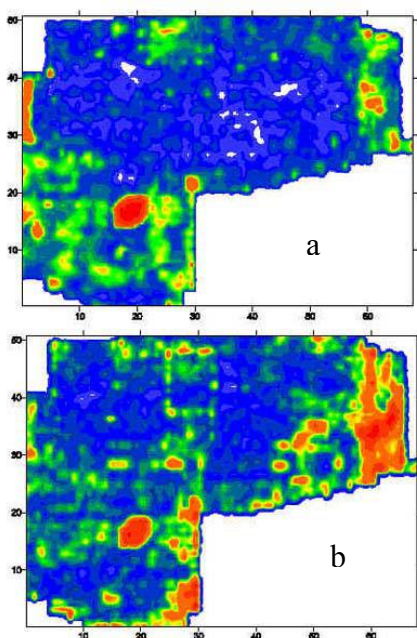


Figura 3.3: Exemplo de mapas de amplitudes (fatias de tempo), resultante de processamento 3D de dados obtidos em um levantamento arqueológico. Os mapas correspondem às profundidades de 0-25 cm (a) e 25-50 cm (b). As áreas azuis denotam pouca ou nenhuma reflexão de radar, indicando material homogêneo. As áreas vermelha e verde são reflexões de maior amplitude, indicando a presença de material altamente contrastante com o meio. Em (b) observa-se uma forma retangular associada a uma construção subterrânea (Conyers, online).

4 - Metodologia

4.1 - Introdução

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica com o intuito de se obter conhecimentos sobre a técnica de GPR e processamento de dados. Também se buscou obter detalhes sobre o estudo original, cujos dados foram disponibilizados para essa monografia. A aquisição de dados foi feita utilizando-se o arranjo de reflexão, em uma área plana correspondente a um campo de futebol, sendo feita uma malha (fig. 4.1 - Cezar, 2001) com 70 linhas de perfil, das quais apenas 40 puderam ser acessadas pelo “software”.

A fase seguinte consistiu na manipulação do “software” Gradix[®], o que permitiu conhecer suas diversas ferramentas para tratamento de dados e também verificar a existência de limitações. Nesta fase foi estabelecido um fluxograma de processamento e também se constatou que alguns dos perfis não puderam ser abertos pelo “software” e outros se mostraram imperfeitos, ao se comparar com o dado original (Fig. 4.2), tendo-se que descartá-los.

Após o processamento, as seções obtidas foram interpretadas, de modo a identificar possíveis anomalias, o que é apresentado no próximo capítulo.

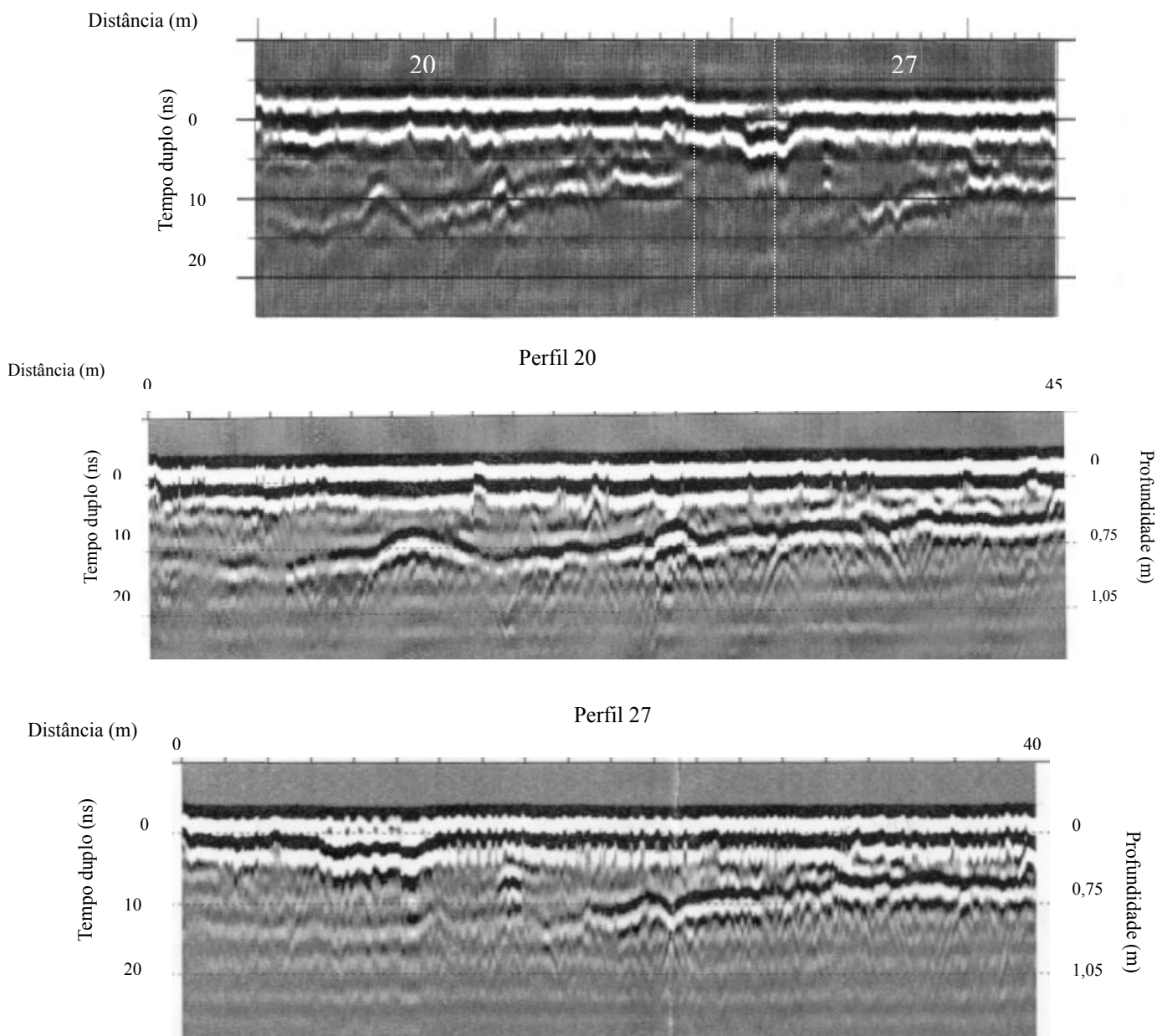


Figura 4.2: Exemplo de imperfeições apresentadas pelo software Gradix[®], o qual aleatoriamente junta dois perfis processados como se fosse um só. Em (a) observa-se que os perfis 20 e 27 foram unidos pelo Gradix[®], o que é verificado comparando-se com os perfis 20 (b) e 27 (c) processados com o Focus[®] (Cezar, 2001).

4.2 - Processamento de Dados

Os dados disponíveis neste trabalho originalmente foram processados com software de sísmica, visando identificar peças arqueológicas. O novo enfoque visava definir parâmetros que ajudassem a identificar não apenas alvos arqueológicos, mas também outras feições, tais como tubulações.

O processamento foi feito empregando-se o “software” Gradix[®], específico para dados de GPR. O “software” apresenta diversas etapas que permitem realçar as imagens de radar. Inicialmente foram testadas algumas das ferramentas disponíveis com a finalidade de se estabelecer um fluxograma padrão que fornecesse os melhores resultados visuais.

O fluxograma estabelecido consistiu das etapas: “dewow”, “declip”, filtro, ganho e “mix” (todas apresentadas no item 3.1), sendo que se pode sintetizar o efeito do processamento como sendo basicamente a aplicação de filtros para retirada de ruídos e aplicação de ganhos para realçar o sinal.

A sequência de figuras a seguir (fig. 4.3 a 4.9, todas correspondentes ao perfil 15), retratam as mudanças ocorridas nos dados em função das etapas do fluxograma estabelecido. A figura 4.3 é um exemplo de um dado não processado, podendo se observar ruídos associados a alvos externos e ao próprio equipamento.

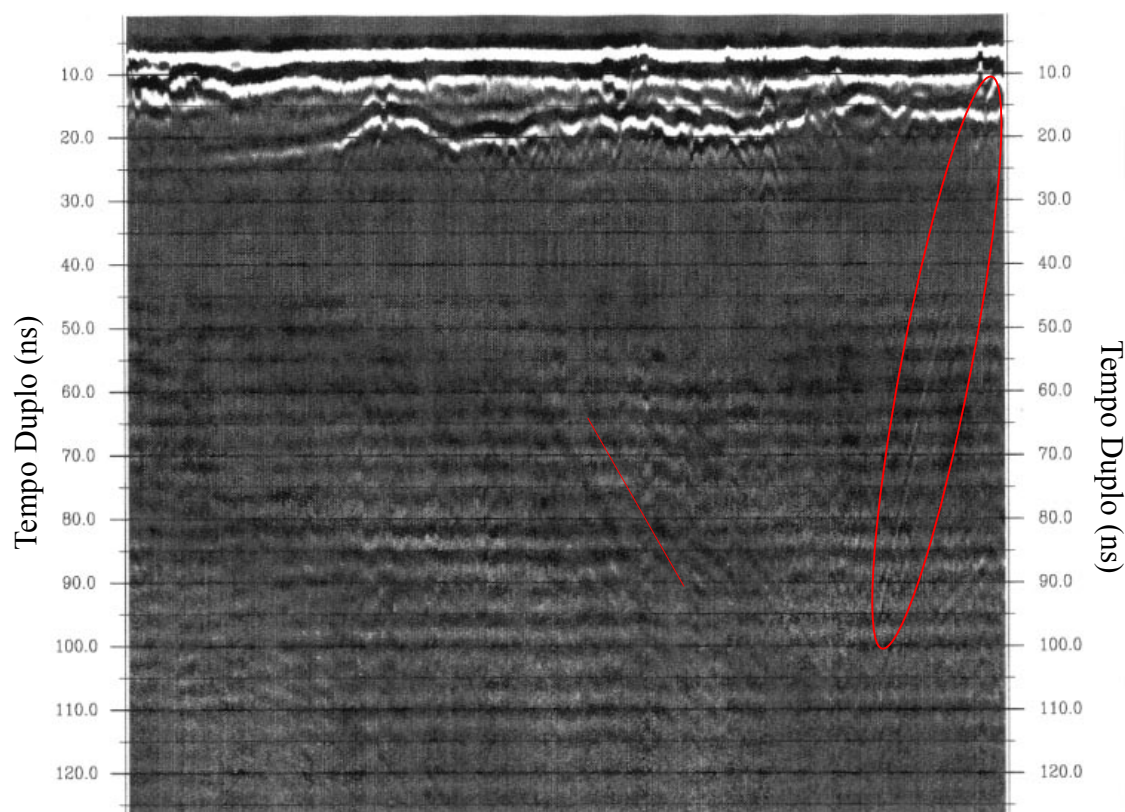


Figura 4.3: Exemplo de uma seção bruta, sem processamento. Observam-se várias feições lineares na porção inferior, correspondentes a ruídos e também está indicada (elipse) uma forma associada a efeito externo (muro de alvenaria).

O primeiro passo do processamento consistiu na aplicação do Dewow (fig. 4.4), que amenizou os efeitos ocasionados pelos ruídos de baixa frequência, como as formas indicadas na figura 4.3.

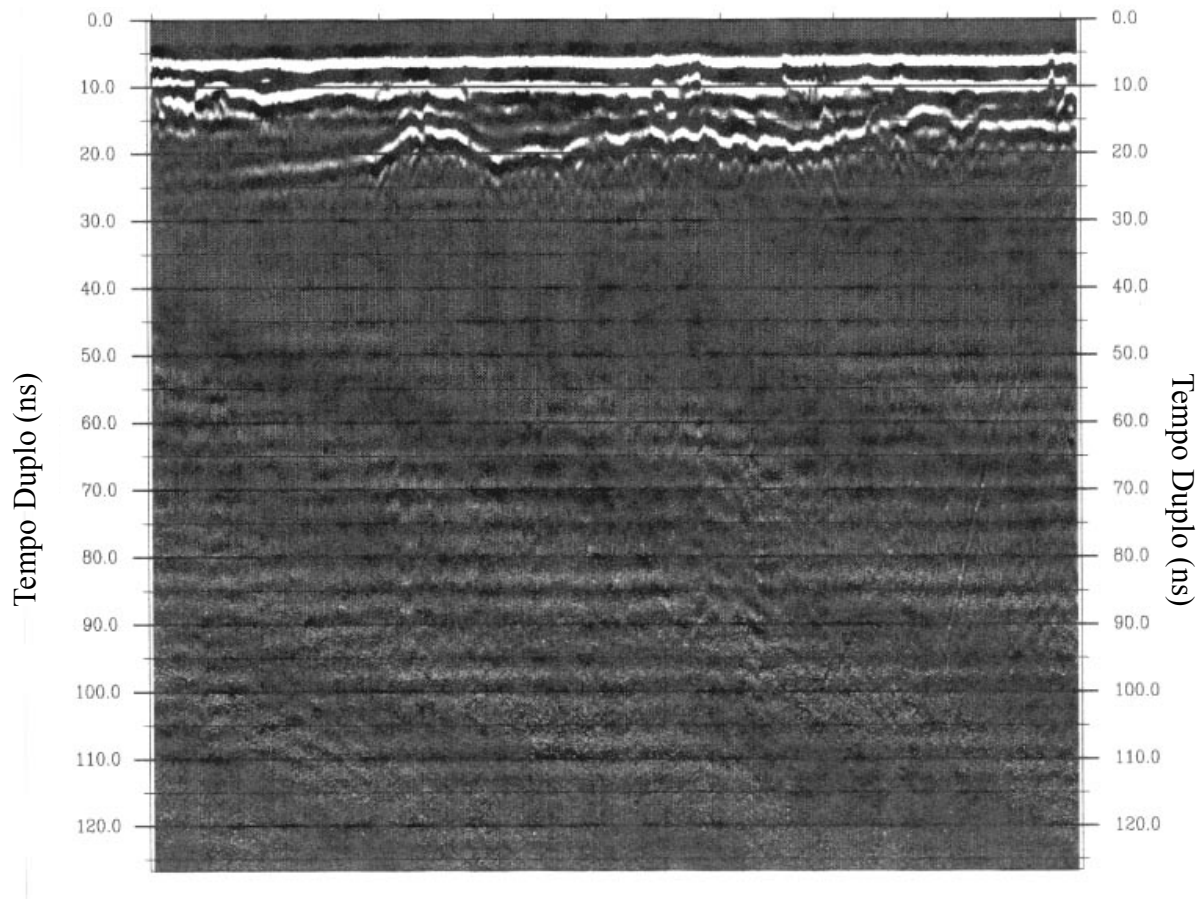


Figura 4.4: Efeito do Dewow na seção de radar anterior.

A etapa “Declip” foi aplicada com a finalidade de restaurar a forma das ondas refletidas. A figura 4.5 mostra o resultado da aplicação do Declip, e comparando-se com a figura anterior, apresenta maior definição na parte superior do perfil, onde estão as reflexões de interesse, sem alterar a parte inferior.

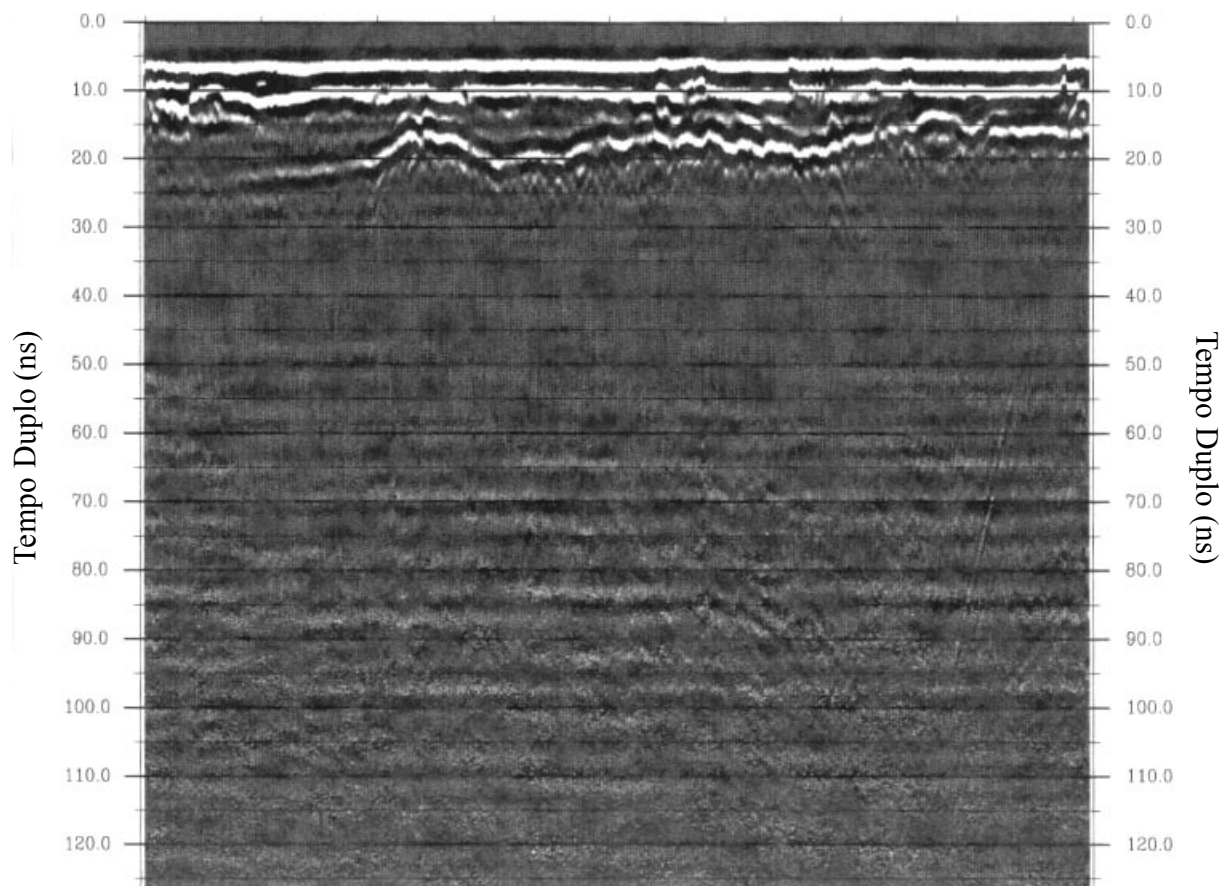


Figura 4.5: A parte superior apresenta maior definição após a aplicação do Declip.

O próximo passo foi a aplicação de filtro. Foram testados vários tipos de filtros inclusive o Gaussiano, que para os dados deste estudo não apresentou bom resultado. O filtro que se mostrou mais adequado foi o passa-banda trapezoidal com as frequências de corte: 100, 200, 400 e 500 MHz. A escolha das referidas frequências foi feita em função da frequência da antena utilizada de 400 MHz. Observa-se na figura 4.6 a redução de ruídos, resultantes da aplicação desse filtro.

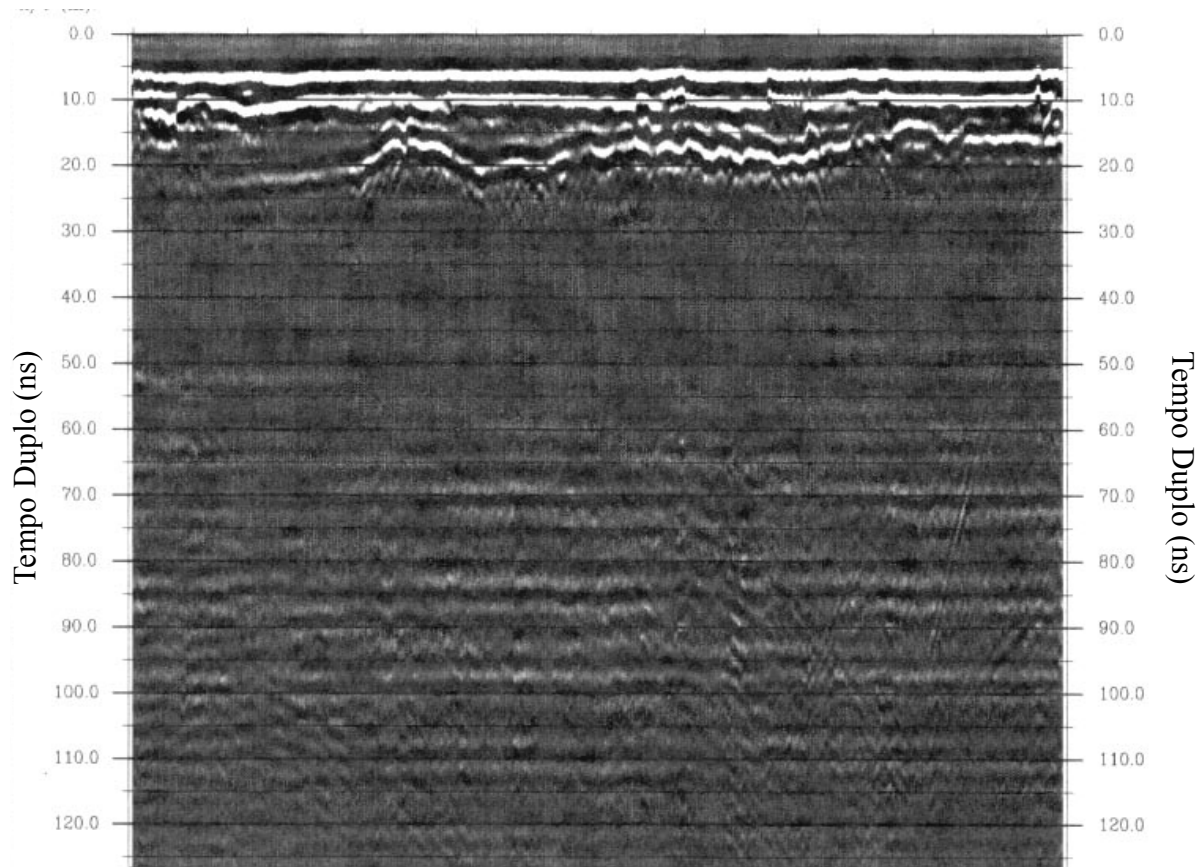


Figura 4.6: Redução de ruídos com aplicação de filtro passa-banda trapezoidal.

A etapa seguinte foi selecionar o ganho a ser aplicado. Inicialmente empregou-se o ganho AGC (ganho automático), que consiste no aumento da amplitude do sinal com a profundidade sendo que para os dados desse estudo, os ruídos se intensificaram. Com isso optou-se pelo ganho constante que manteve apenas as reflexões principais e eliminou todo ruído da parte inferior (figura 4.7). Na verdade os ruídos foram eliminados visualmente, isto é, o ganho fez com que as amplitudes dos sinais fossem acrescidas de um mesmo valor, com isso os ruídos de baixa amplitude foram relativamente “apagados” tendo em vista que os sinais de amplitude maiores receberam o mesmo aumento.

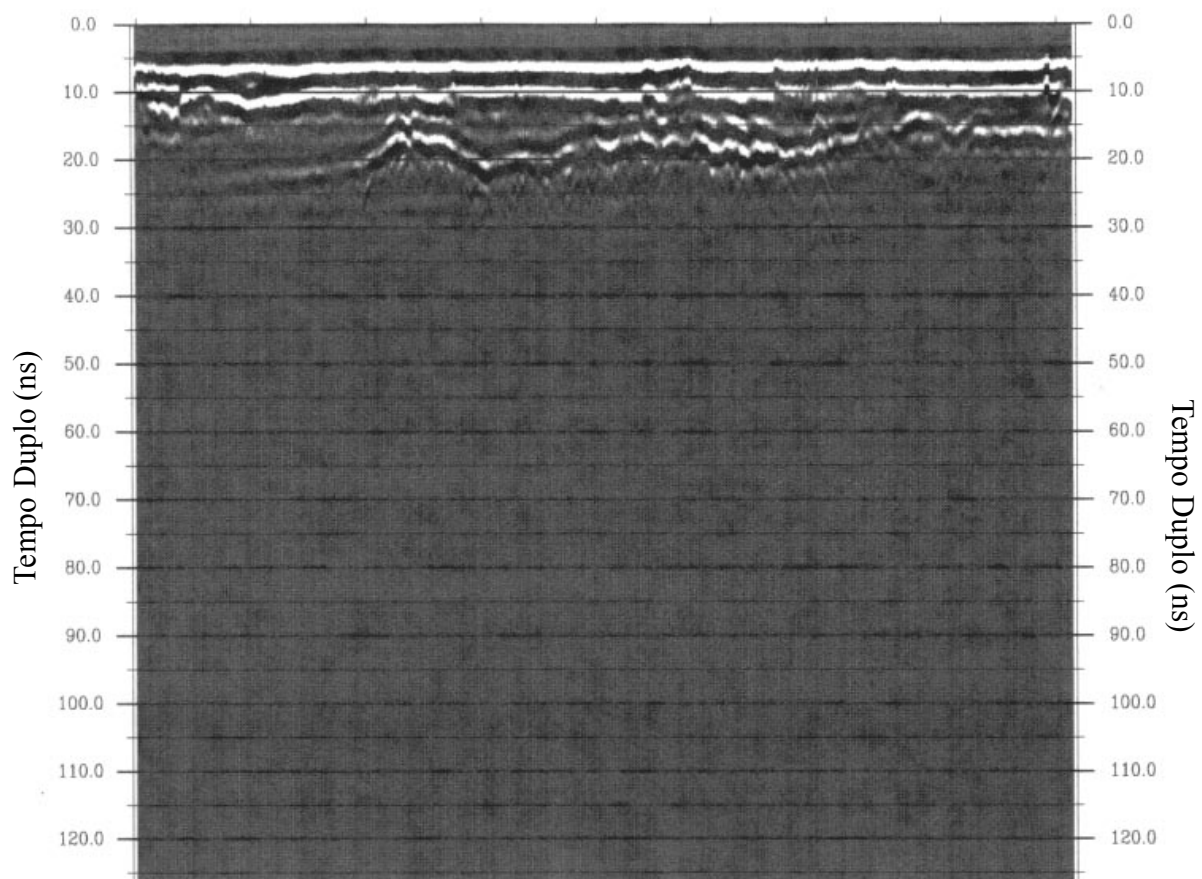


Figura. 4.7: A aplicação do ganho constante incrementou as reflexões de maiores amplitudes de tal forma que ocasionou a eliminação dos ruídos de baixa amplitude.

Foi testada a possibilidade de se aplicar somente um ganho de visualização, no dado não processado, como mostra a figura 4.8. No entanto comparando-se com a figura anterior, que é o resultado de um ganho aplicado em cima de outras etapas de processamento, observa-se uma melhor qualidade da seção. A aplicação de ganho de visualização pode ser feita como um artifício de processamento preliminar no campo, quando se quer ter uma idéia inicial dos dados.

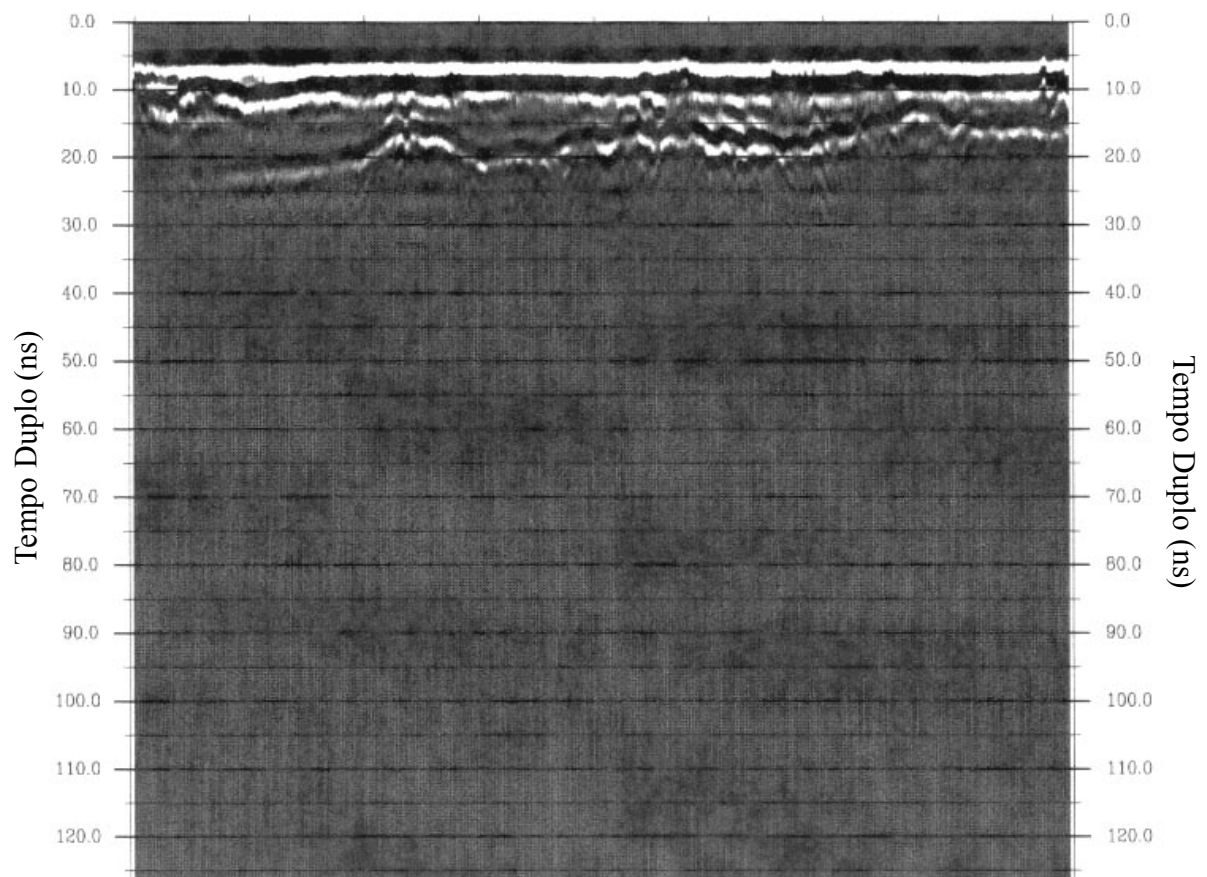


Figura 4.8: Efeito do ganho de visualização no dado bruto. Há perda de definição em relação à seção anterior, a qual passou por todas as etapas de processamento antes da aplicação do ganho.

A última etapa foi o “Mix” dos traços, apresentado no item 3.1, que suavizou as reflexões, porem reduzindo a resolução horizontal, conforme figura 4.9.

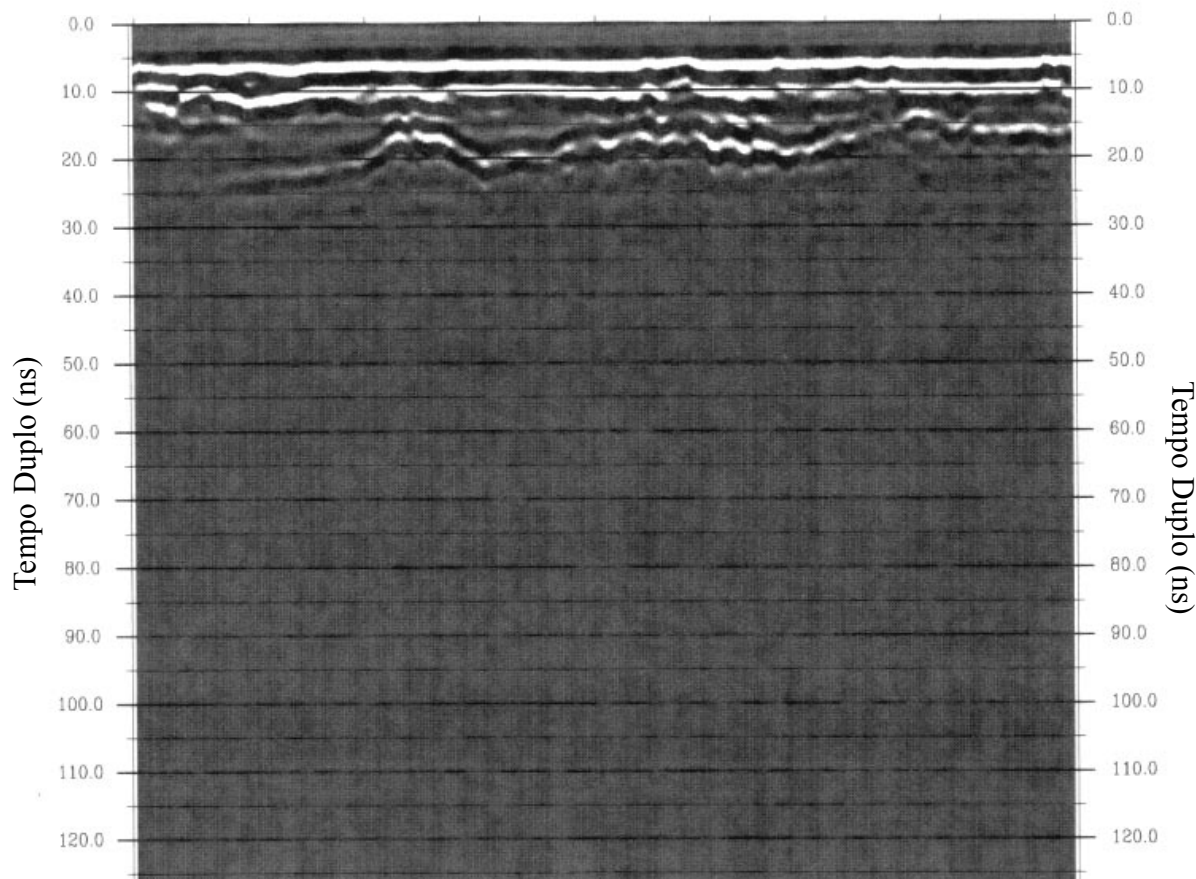


Figura. 4.9: Seção final, contendo todas as etapas de processamento, inclusive o Mix, que tornou as reflexões mais suaves.

4.3 - Determinação das Profundidades dos Refletores nas Seções de Radar

As profundidades dos refletores foram determinadas a partir de valores estimados (como apresentado na tabela 2.1, Davis & Annan, 1989) para a velocidade dos materiais encontrados no subsolo.

Em todas as seções de radar obtidas, observa-se uma interface de reflexão bem marcada e a sondagem a trado (item 1.2) revelou ser a interface areia/argila. Sabe-se que estes materiais podem apresentar propriedades elétricas contrastantes e originar feições bem marcadas nas seções de radar. A constatação da referida interface auxiliou na determinação da profundidade dos refletores, cujos procedimentos são explicados a seguir (Cezar, 2001).

Em todas as seções de radar, nos trechos posicionados acima da interface areia/argila, foi considerado que a onda eletromagnética deslocava-se com velocidade

de 0,15 m/ns (velocidade em areia seca, ver tabela 2.1), enquanto que, abaixo da referida interface, foi considerada a velocidade de propagação da onda de 0,06 m/ns (velocidade na argila, ver tabela 2.1). Com base nos referidos valores de velocidade e também com o tempo duplo de trajetória da onda eletromagnética, as profundidades acima (P_1) da interface e abaixo (P_2), foram calculadas de acordo com as expressões:

$$P_1 = v_1 \frac{t_d}{2}, \quad \text{Equação 4.1}$$

$$P_2 = P_1 + \left(v_2 \frac{t_d}{2} \right). \quad \text{Equação 4.2}$$

Sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 - \text{profundidade acima da interface areia/argila;} \\ v_1 - \text{velocidade de propagação na areia;} \\ t_d - \text{tempo duplo;} \\ P_2 - \text{profundidade abaixo da interface areia/argila;} \\ v_2 - \text{velocidade de propagação na argila.} \end{array} \right.$$

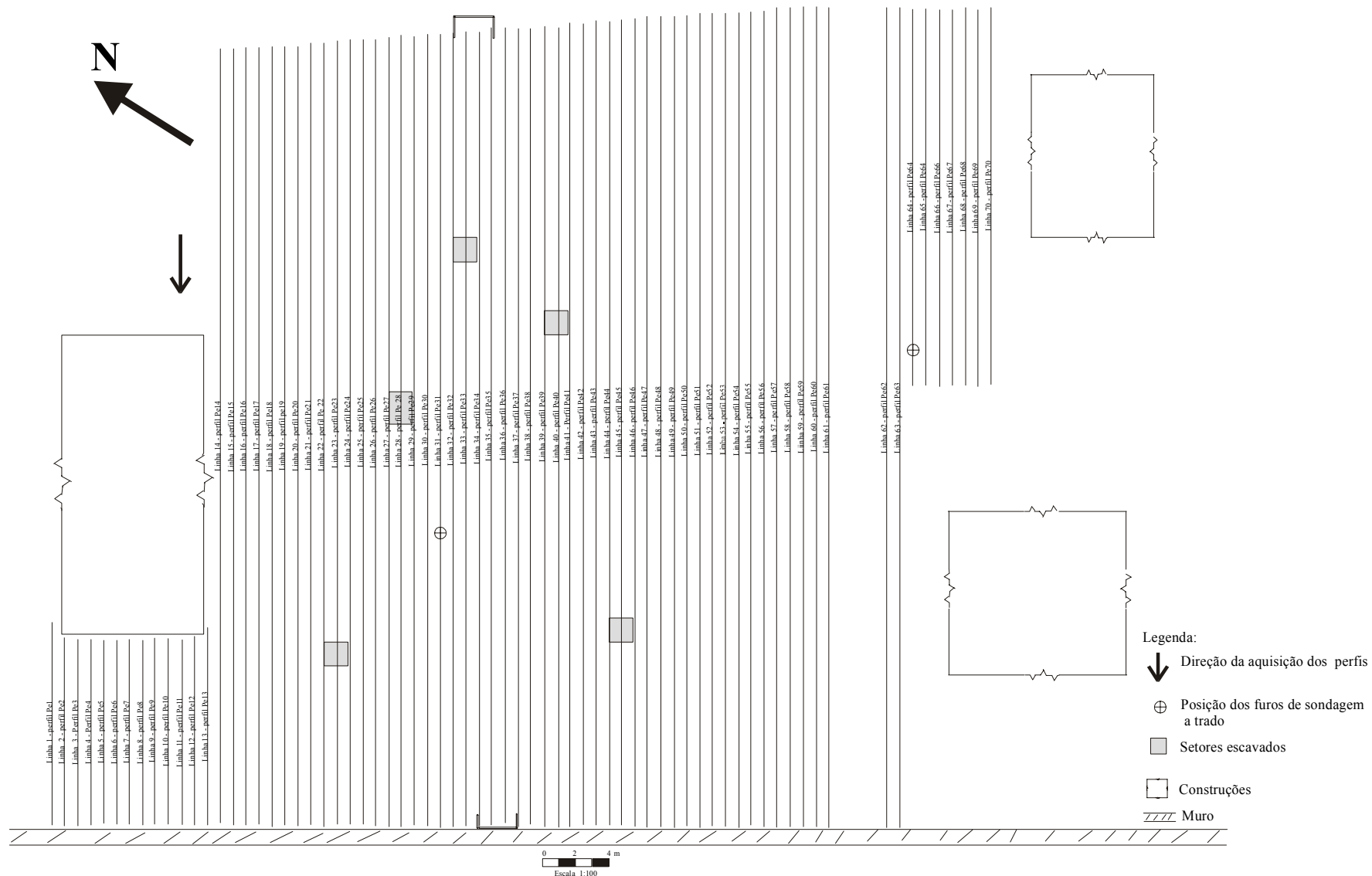


Figura 4.1: Croqui contendo a localização dos perfis de radar disponibilizados para este estudo (Cezar, 2001).

5 – Interpretação dos Dados e Resultados

5.1 - Introdução

A interpretação de dados de radar tem um caráter bastante subjetivo e requer um prévio conhecimento das características do local onde foi realizado o levantamento, isto é, a constituição e as condições do subsolo, bem como as feições da superfície. Tal conhecimento é fundamental para evitar interpretações errôneas, pois nas seções de radar (radargramas), mesmo após a fase de processamento, é comum observar anomalias correspondentes a alvos que não são de interesse para a pesquisa. No entanto, por falta de tempo hábil não foi possível ir ao local da aquisição de dados e com isso, todo o conhecimento que se tem sobre a área foi adquirido da bibliografia.

Em todas as seções de radar que serão apresentadas, as escalas verticais à esquerda representam o tempo duplo da trajetória da onda, em nano segundos, ou seja, o tempo que o pulso de radar levou para atingir interfaces de reflexão e retornar à antena receptora. As escalas verticais à direita representam a profundidade de cada interface, em metros, calculada a partir da estimativa da velocidade de propagação da onda no meio, como descrito no item 4.3. A escala horizontal é a extensão do perfil em metros.

5.2 - Interpretação dos Radargramas

Os radargramas processados foram analisados visando reconhecer feições indicativas de anomalias que pudessem estar associadas a alvos subterrâneos.

A análise dos radargramas foi feita de modo a verificar a continuidade lateral das anomalias, o que possibilitou destacar aquelas com características que poderiam estar associadas a tubulações e artefatos arqueológicos. Este procedimento permitiu estabelecer três grupos de perfis, sendo que os dois primeiros grupos apresentam anomalias que podem representar uma seqüência correspondente a uma mesma feição subterrânea. O terceiro grupo é composto de perfis cujas anomalias não são contínuas, isto é, não são observáveis em vários perfis consecutivos.

A primeira seqüência consiste dos perfis 1, 2, 5, 6, e 7, cuja interpretação foi feita com auxílio dos dados processados com o software de sísmica, tendo em vista que a feição correspondente a uma provável tubulação apresenta-se mais nítida nesses dados, embora observam-se muitos efeitos de ruídos. As figuras a seguir (5.1 a 5.6)

mostram os perfis desta sequência processados com o Gradix[®] e com o Focus[®] (Cezar, 2001), podendo-se notar as anomalias.

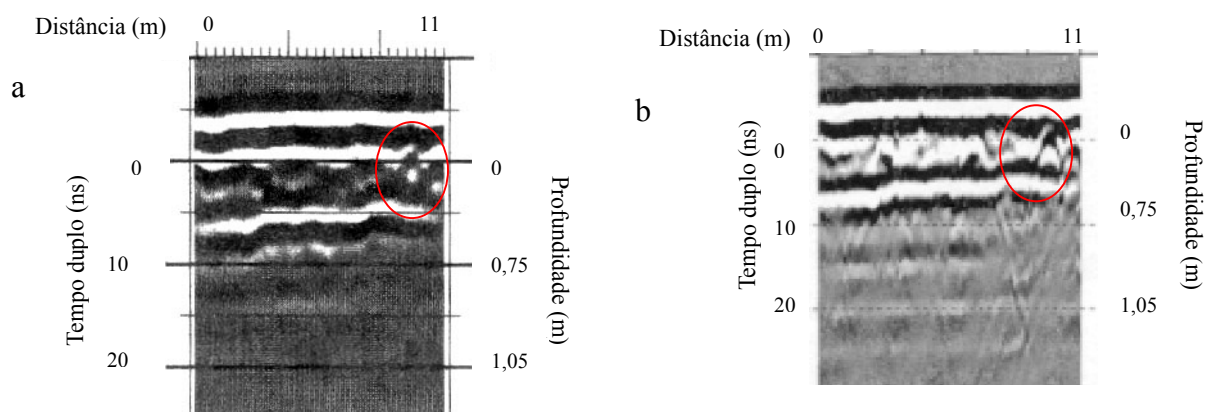


Figura 5.1: Perfil 1 processado com os “softwares” Gradix[®] (a) e Focus[®] (b). Está indicada anomalia, que é melhor observada no segundo radargrama, mas que apresenta muitos ruídos.

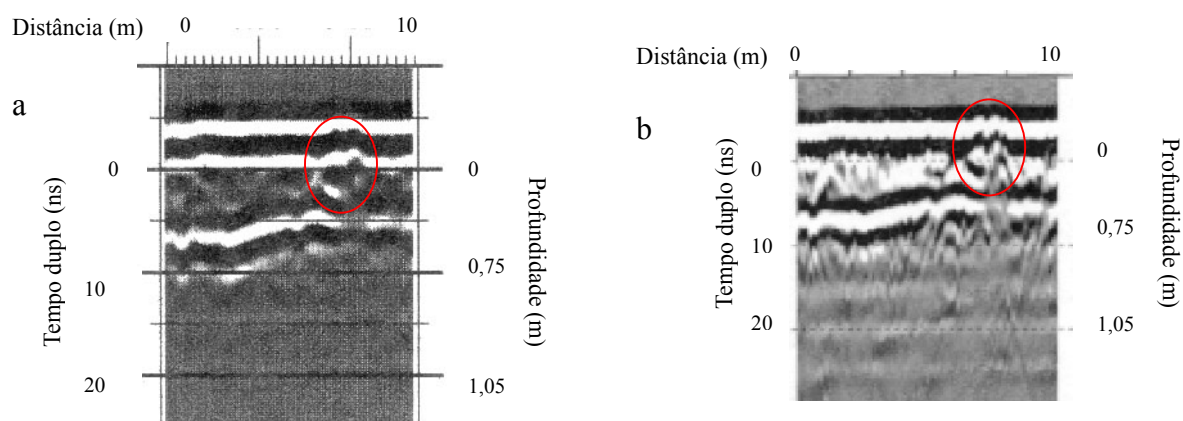


Figura 5.2: Perfil 2 processado com os “softwares” Gradix[®] (a) e Focus[®] (b).

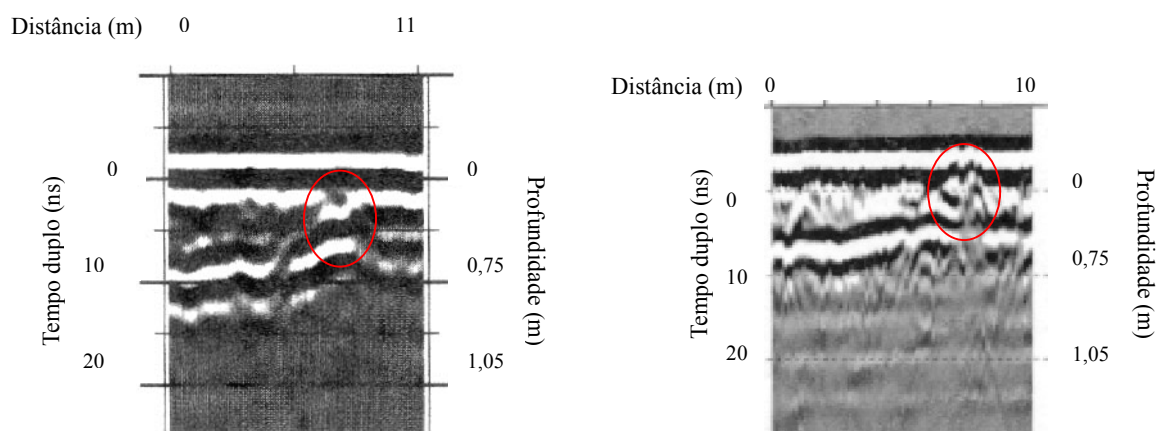


Figura 5.3: Perfil 5 processado com os “softwares” Gradix[®] (a) e Focus[®] (b).

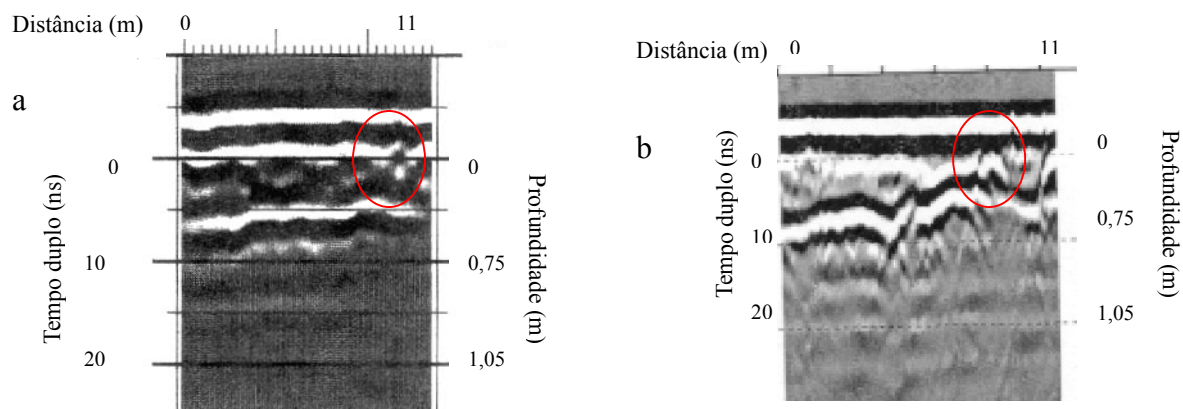


Figura 5.4: Perfil 6 processado com os “softwares” Gradix[®] (a) e Focus[®] (b).

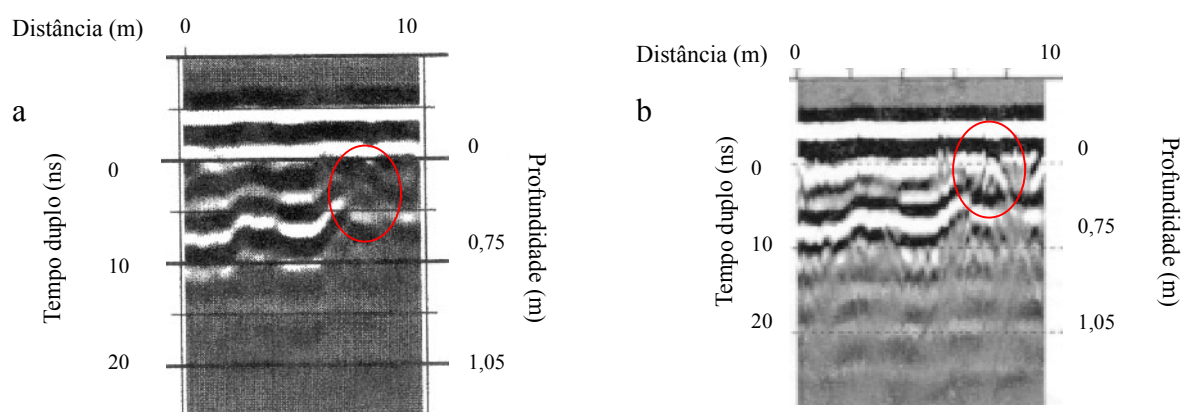


Figura 5.5: Perfil 7 processado com os “softwares” Gradix[®] (a) e Focus[®] (b).

A segunda sequência compreende os perfis: 14, 15, 16, 18 e 19, que também apresentaram feições que poderiam estar associadas a tubulações.

A lacuna observada entre as duas primeiras sequências se deve provavelmente a deterioração da tubulação cuja composição poderia ser cerâmica, que pode estar muito danificada em alguns trechos não sendo mais perceptível pelo radar.

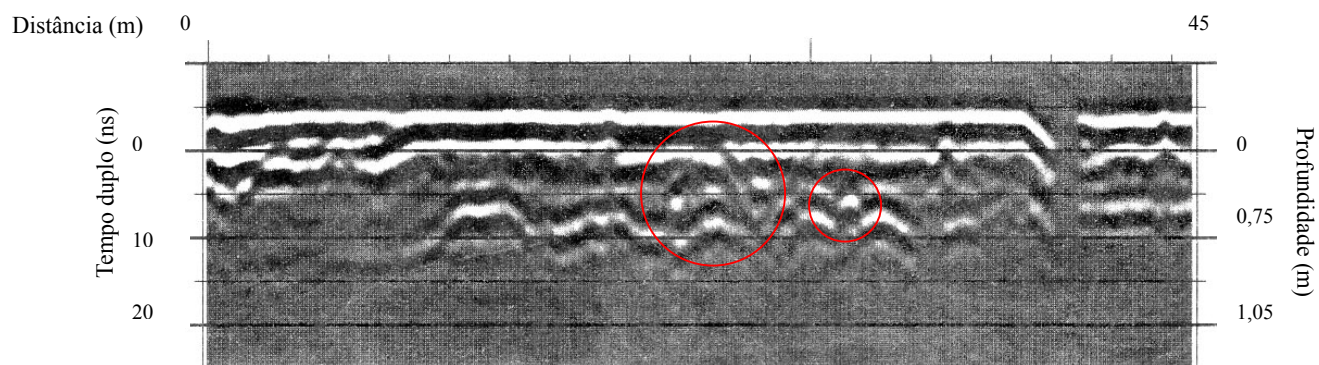


Figura 5.6: Perfil 14. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.

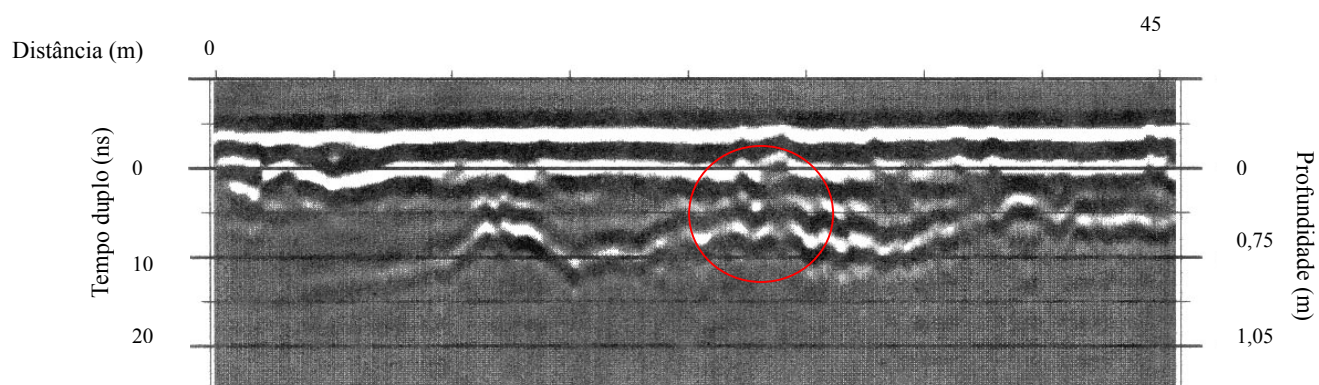


Figura 5.7: Perfil 15. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações

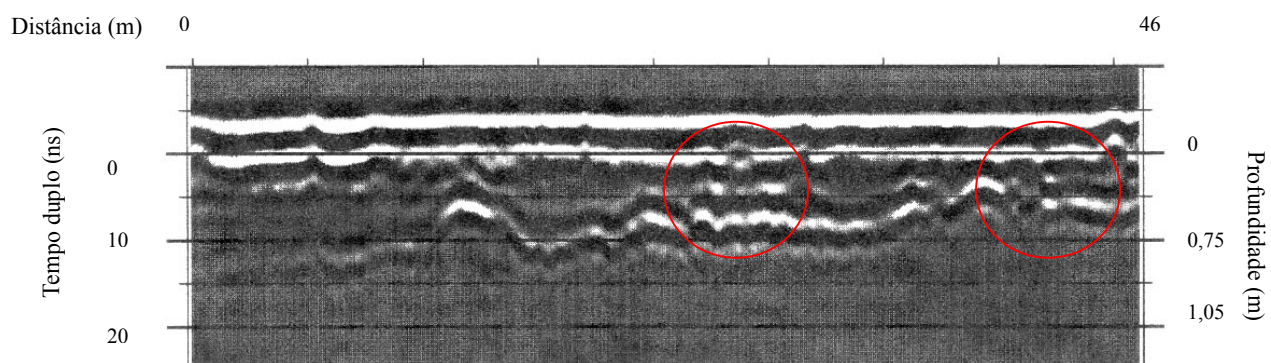


Figura 5.8: Perfil 16. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.

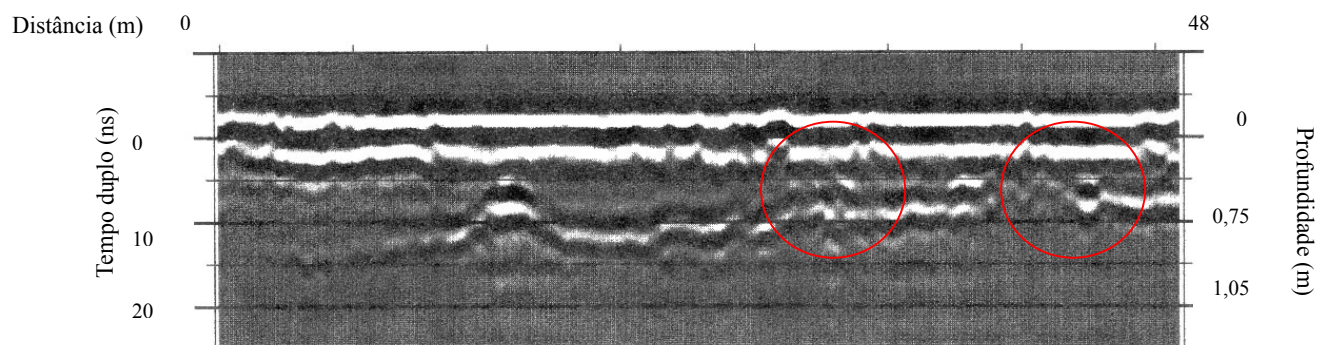


Figura 5.9: Perfil 18. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.

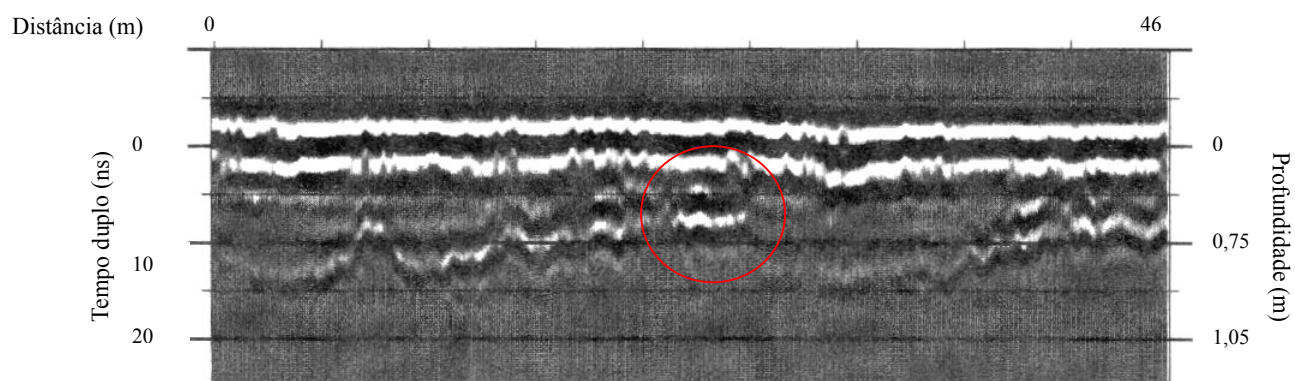


Figura 5.10: Perfil 19. Estão indicadas as anomalias interpretadas como possíveis tubulações.

A terceira sequência é composta pelos perfis 36, 41, 49, 50, 59 e 62 (figuras 5.11 a 5.16), cujas anomalias não apresentam continuidade e poderiam ser alvos isolados.

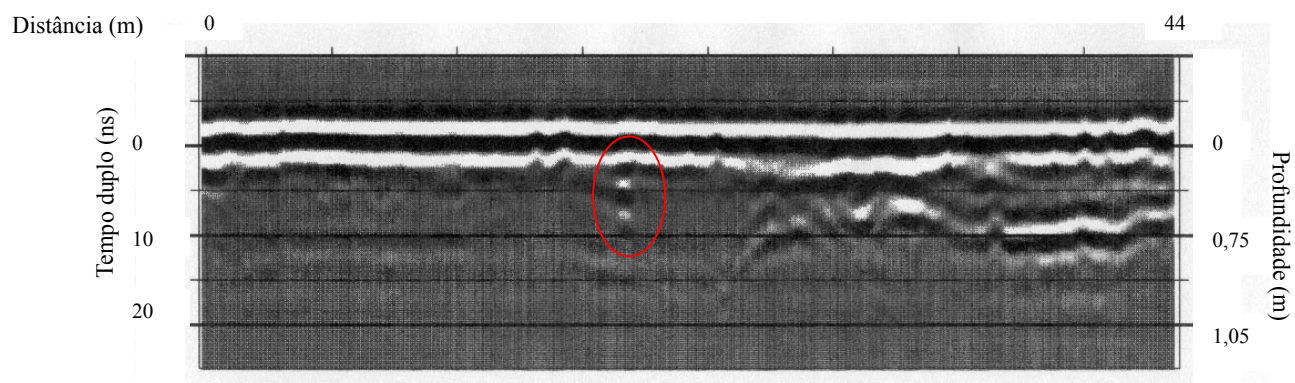


Figura 5.11: Perfil 36. As feições mais significativas estão indicadas.

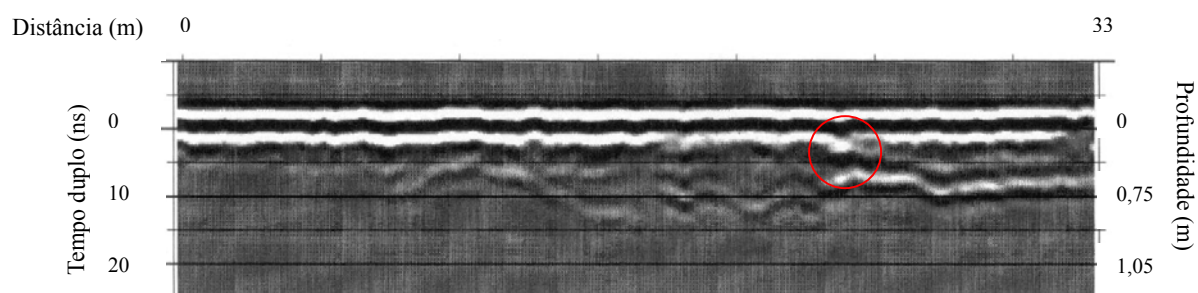


Figura 5.12: Perfil 41. As feições mais significativas estão indicadas.

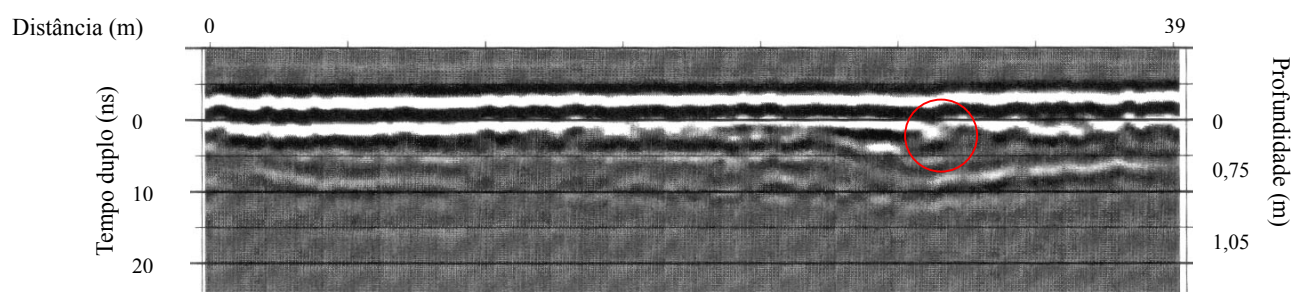


Figura 5.13: Perfil 49. As feições mais significativas estão indicadas.

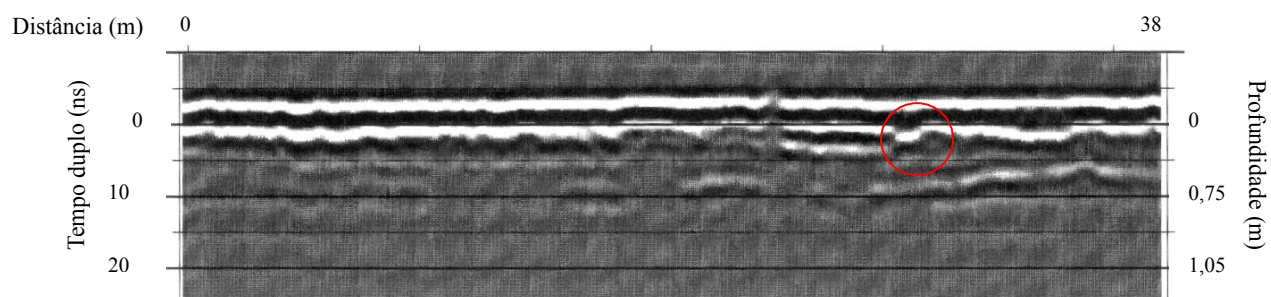


Figura 5.14: Perfil 50. As feições mais significativas estão indicadas.

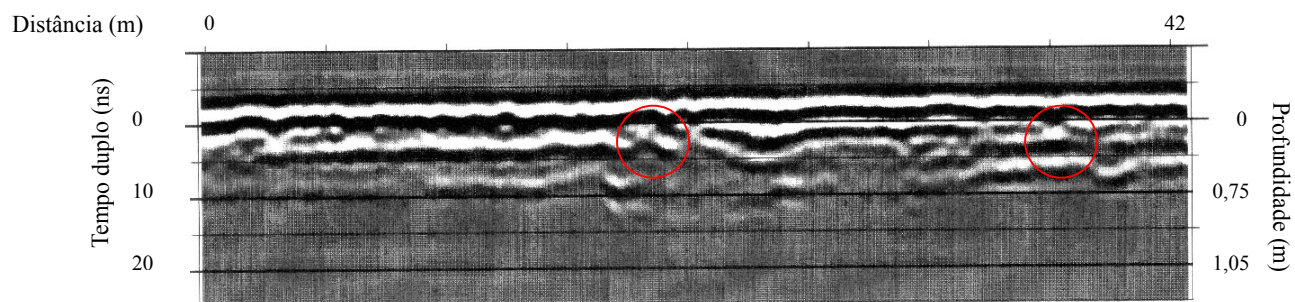


Figura 5.15: Perfil 59. As feições mais significativas estão indicadas.

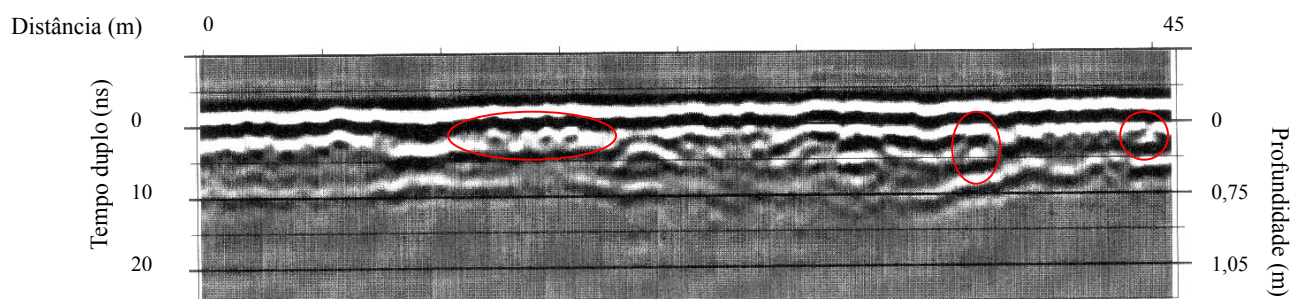


Figura 5.16: Perfil 62. As feições mais significativas estão indicadas.

As demais seções de radar processadas com o Gradix e que não apresentaram problemas, estão apresentadas em anexo.

Vale ressaltar que em todas as seções analisadas observa-se um refletor bem marcado, que corresponde à interface areia/argila, identificada nas sondagens a trado.

A fase seguinte deveria ser a verificação da interpretação realizando-se escavações no campo. Porém por falta de tempo hábil, isto não foi possível realizar até este momento.

6 - Considerações Finais e Conclusões.

A técnica de GPR, na investigação de subsuperfície rasa, possui um grande potencial de aplicação, por ser não invasiva, fornecer dados com alta resolução e pelo seu caráter preditivo, que possibilita preestabelecer áreas a serem escavadas. Entretanto, nessa pesquisa, e também em outras registradas na bibliografia, pode-se verificar que o GPR apresenta limitações que restringem seu emprego em diversas circunstâncias, ou seja, em relação às propriedades eletromagnéticas do alvo e do meio.

Nesse trabalho pode-se constatar vantagens e limitações do “software” Gradix. Uma das vantagens do programa é a possibilidade de utilizá-lo em PC’s, isto é, trata-se de um programa portátil, podendo-se utilizar no campo, reduzindo custos, e aumentando a eficiência do levantamento. Em relação ao processamento original, os dados ficaram mais nítidos, entretanto o fluxograma de processamento dos dados do Gradix, em algumas seções de radar ocasionou uma perda nos sinais, obliterando a visualização de algumas feições, que puderam ser confirmadas pela comparação com os dados processados com o “software” de sísmica.

O processamento de dados é uma etapa necessária para a interpretação dos dados disponíveis, por eliminar os ruídos e realçar as reflexões provenientes do subsolo.

7 – Referências Bibliográficas

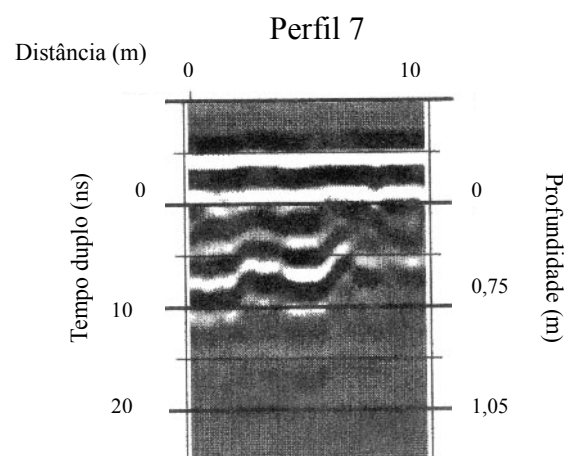
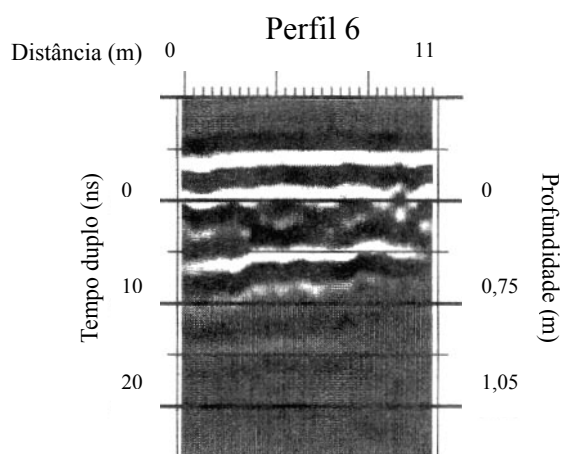
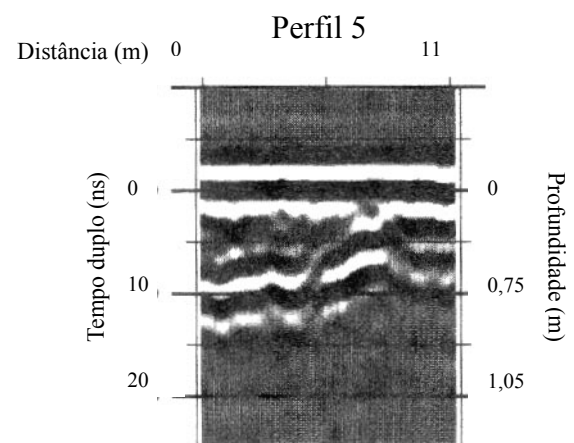
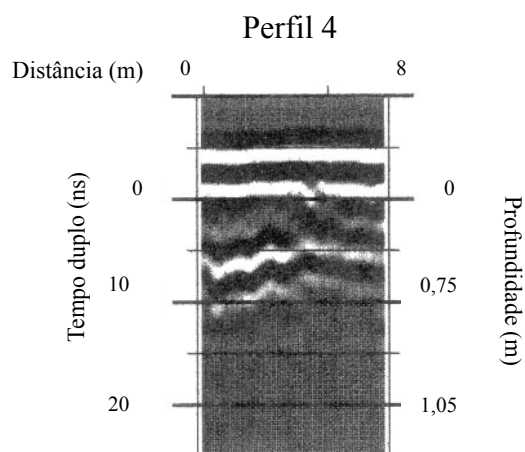
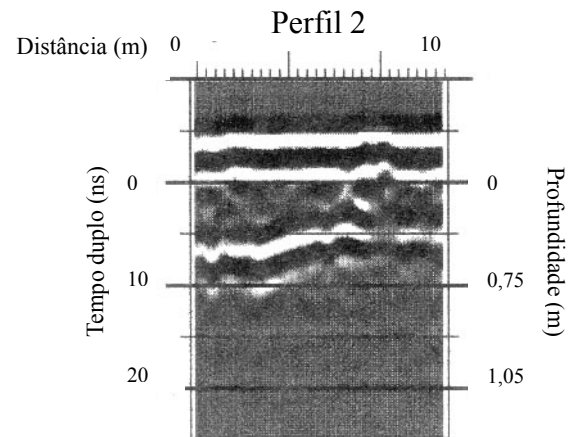
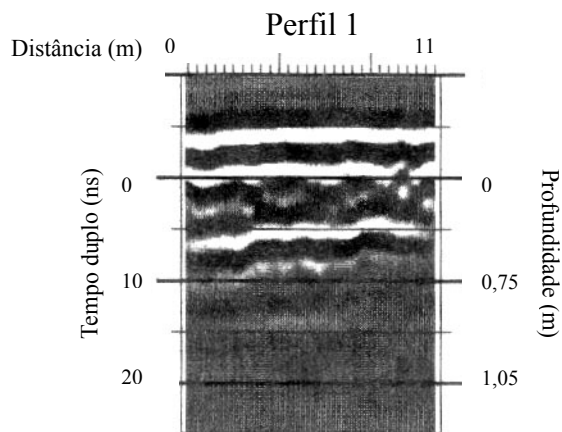
- Annan, A.P. 1992. Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensors and Softwares, Inc. Canadá, 80 p.
- Basile, V., Carrozzo, M.T., Negri, S., Nuzzo, L., Quarta, T. & Villani, A. V. 2000. A Ground-Penetrating Radar Survey for Archaeological Investigations in an Urban Area (Lecce, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 44, 1: 15-32.
- Birken, R. & Versteeg, R. 2000. Use Of Four-Dimensional Ground Penetrating Radar And Advanced Visualization Methods to Determine Subsurface Fluid Migration. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 2-4: 215-226.
- Buarque, A. 1999. A Cultura Tupinambá no Estado do Rio de Janeiro, in: M.C. Tenório (ed.) *Pré-História da Terra Brasilis*. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 307-320.
- Buarque, A. & Martins, J.S. 1999. Os Sítios Arqueológicos e a Ocupação do Espaço na Região dos Lagos. In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia. Recife/Olinda-PE. CD-ROM.
- Cezar, G. S. 2001. *Aplicação do Radar de Penetração no Solo (GPR) em Sítios Arqueológicos Localizados em Araruama, RJ*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Dissertação de Mestrado, 136p.
- Conyers, L.B. 1996. The Use of Ground Penetrating Radar to Map the Archaeology and Paleogeography of Ceren Site, El Salvador. *Proceedings of Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Tohoku University, Sendai, Japan. 89-94.
- Conyers, L. B. Potential solution to the problem of finding buried archaeological features. http://www.du.edu/~lconyers/saa/the_whole_paper.doc
- Daniels, J.J. 2000. *Ground Penetrating Radar Fundamentals*. U.S.E.P.A. USA, 20p.
- Davis, J.L. & Annan, A.P. 1989. Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551

- Fonseca, M.J.G., Serrão, M.A. & Peçanha, R.M. 1998. *Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro. Escala 1:400.000. DNPM.
- Galli, V.L. & Souza, L.A.P. 1999. GPR - Exemplos De Aplicação. *Proceedings of the Sixth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Rio de Janeiro. CD-ROM.
- Herman H. 1997. *Robotic Subsurface Mapping Using Ground Penetrating Radar*. PhD Thesis. The Robotics Institute. Carnegie Mellon University. EUA
- Jol, H. M. & Smith, D.G. 1995. Ground Penetrating Radar Surveys of Peatlands for Oilfied Pipelines in Canada. *Journal of Applied Geophysics*, **34**: 109-123.
- Lima, G.R. 1968. Esboço Preliminar de um Estudo Geomorfológico da Folha de Araruama. *Revista Brasileira de Geografia*, **4**: 51-53.
- Machado, R. & Demange, M. 1990. Reinterpretação Estrutural e Tectônica da Região a Leste da Baía da Guanabara e a Definição do Batólito de Araruama (RJ). In: 36º Congresso Brasileiro de Geologia. Natal, RN. **6**:2744-2754.
- Mitchell, J.K. 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*. 2 ed. EUA, John Willey & Sons, 437 p.
- Parasnis, D.S. 1997. *Principles of Applied Geophysics*. 5 ed. Londres, Chapman & Hall, 437 p.
- Rocha, P.L.F., Cezar, G.S., Buarque, A. & Costa, A. 2000a. Archaeological Sites at Rio de Janeiro State, Brazil, with their Contents Enhanced by the Use of Ground Penetrating Radar. In: Noon, DA., Stickley, G.F. & Longstaff, D., (eds.), Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, Austrália, SPIE Vol. 4084, pp. 607-611.
- Smemoe, C. M. 2000. *Processing and Visualization of Ground Penetrating Radar Data for Assessing Natural Hydrogeologic Conditions*. Term Paper 540, Department of Civil Engineering, Brigham Young University. 39 p.
- Telford, W.M., Geldart, LP. & Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. 2 ed. Cambridge University Press, 770 p.

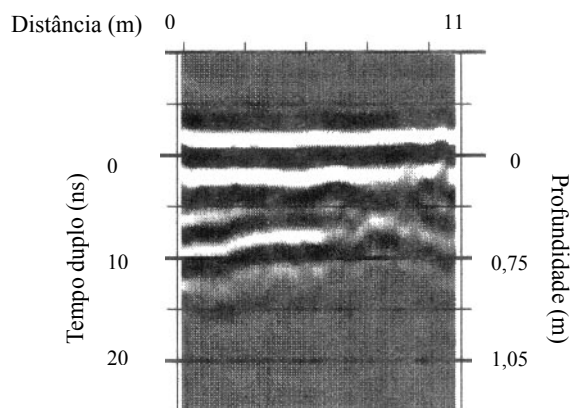
- Turner, G., Siggins, A.F. & Hunt, L.D. 1993. *Ground Penetrating Radar – Will it Clear the Haze at Your Site?*. The Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists, **24**: 819-832.
- Vaughan, C.J. 1986. Ground-Penetrating Radar Surveys Used in Archaeological Investigations. *Geophysics, Special Issue: Geophysics in Archaeology*, 51, **3**: 595-604.
- Vogelsang, D. 1995. *Environmental Geophysics, A Practical Guide*. Alemanha, Springer-Verlag, 173 p.
- Young, J.D. & Peters Jr., L. 1996. A Brief History of GPR Fundamentals and Applications. *Proceedings of Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Tohoku University, Sendai, Japan. 5-14.
- GRADIX User's Manual, Interpex Ltd., 1996. 224 p.

Apêndice

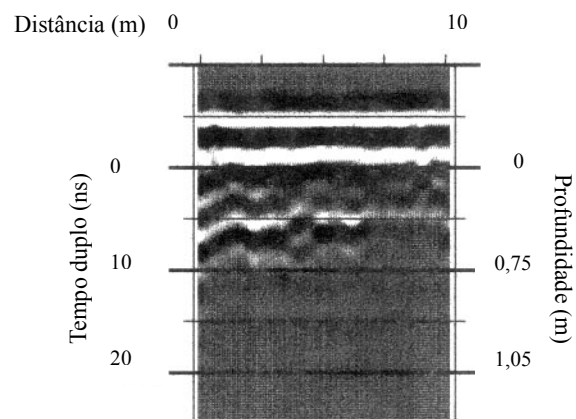
Radargramas Processados com o Gradix®



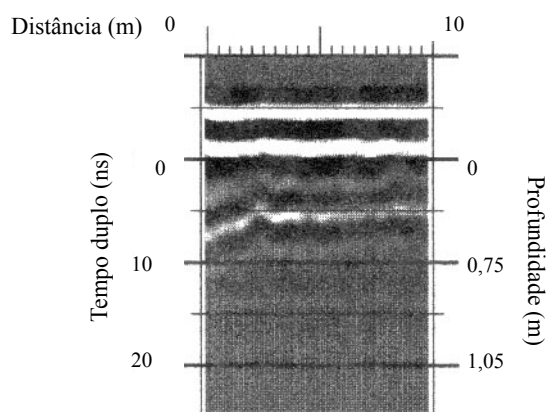
Perfil 8



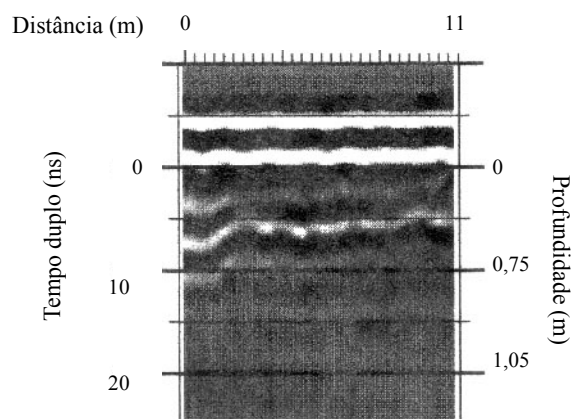
Perfil 9



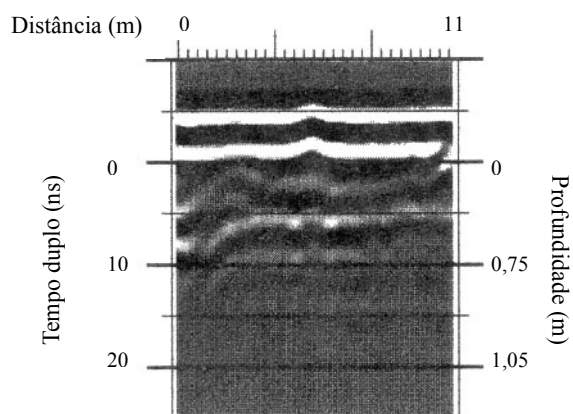
Perfil 11



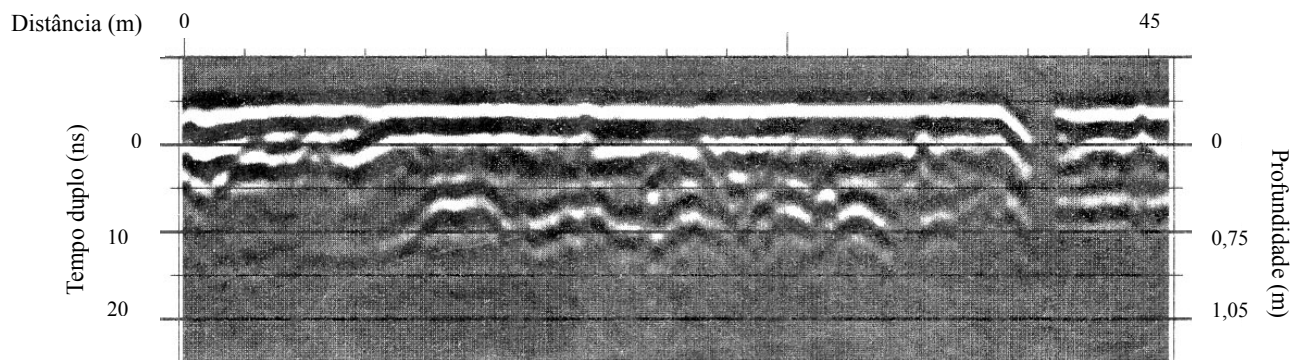
Perfil 12



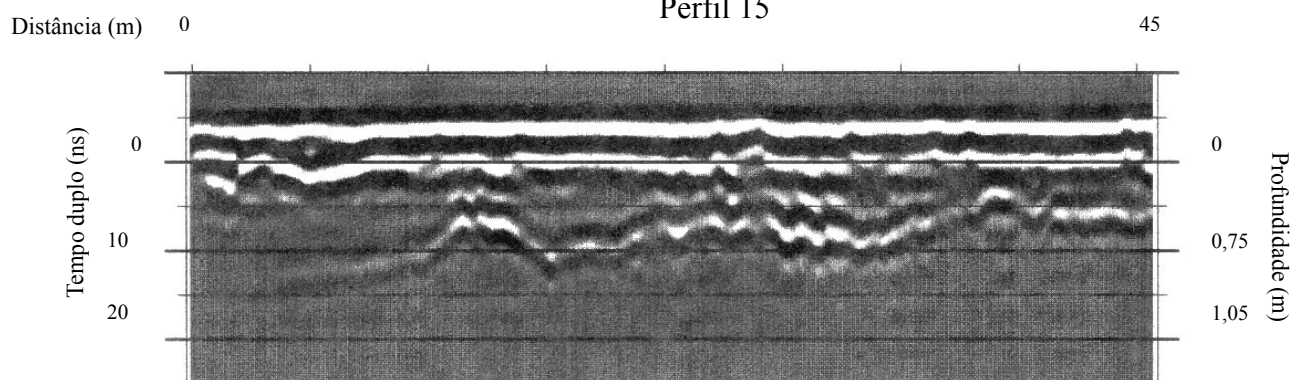
Perfil 13



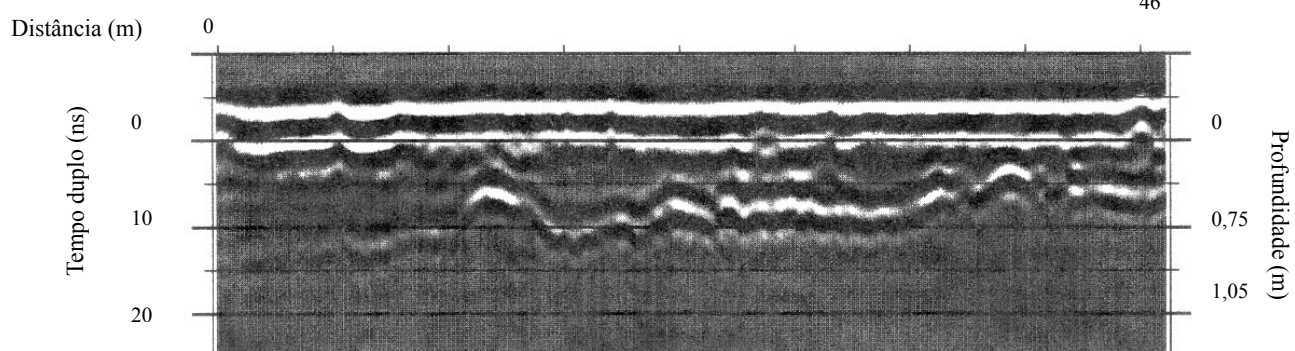
Perfil 14



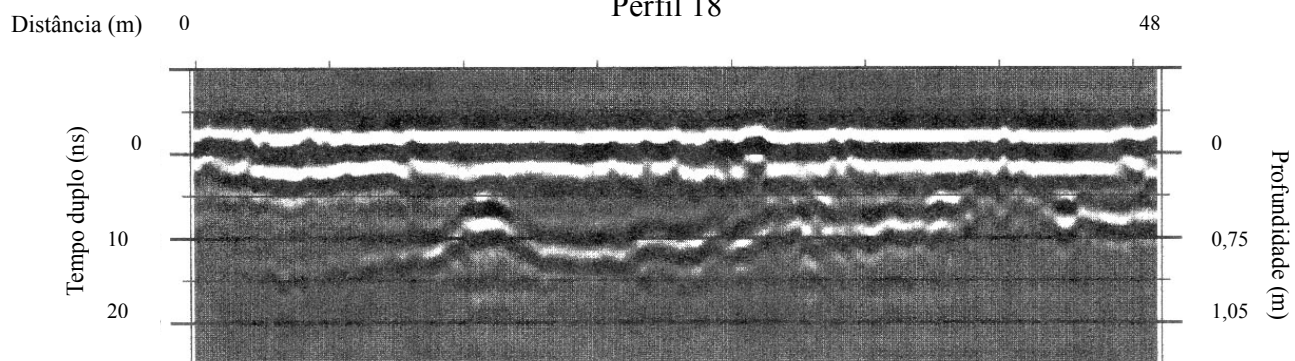
Perfil 15



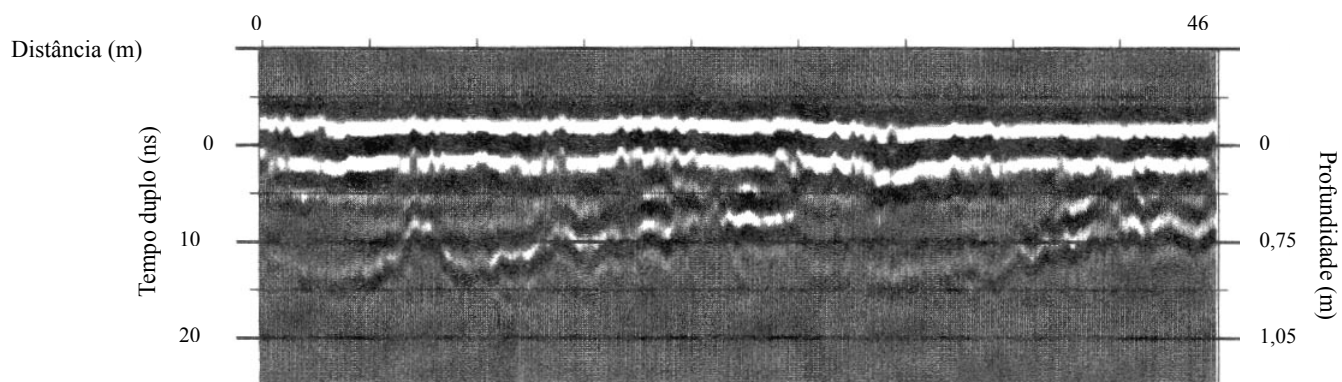
Perfil 16



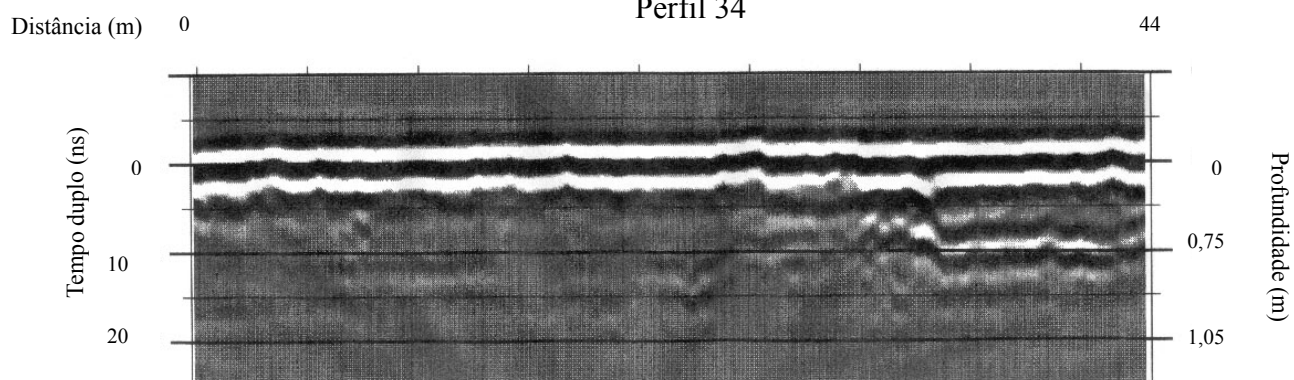
Perfil 18



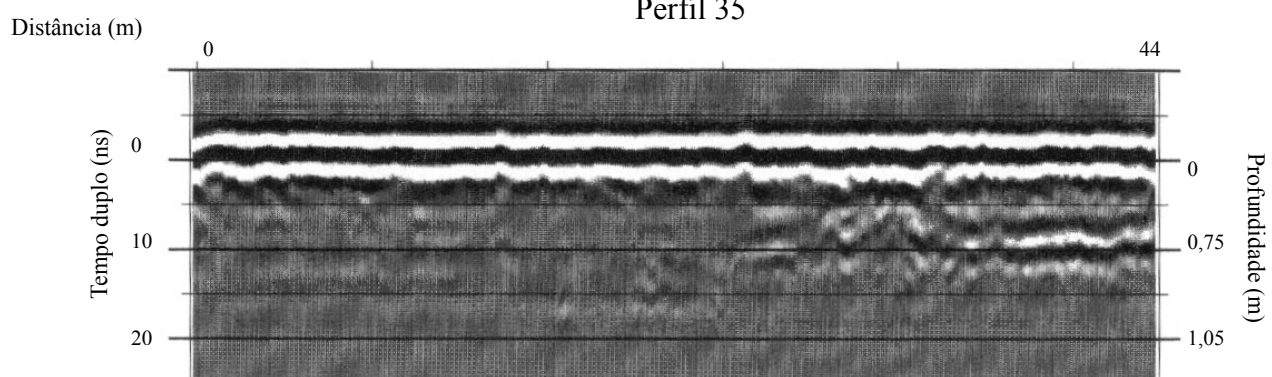
Perfil 19



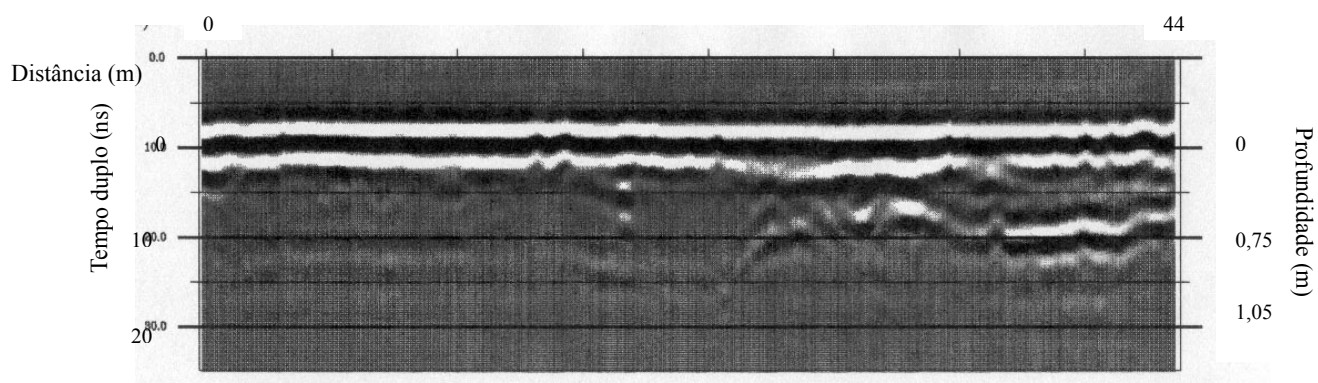
Perfil 34



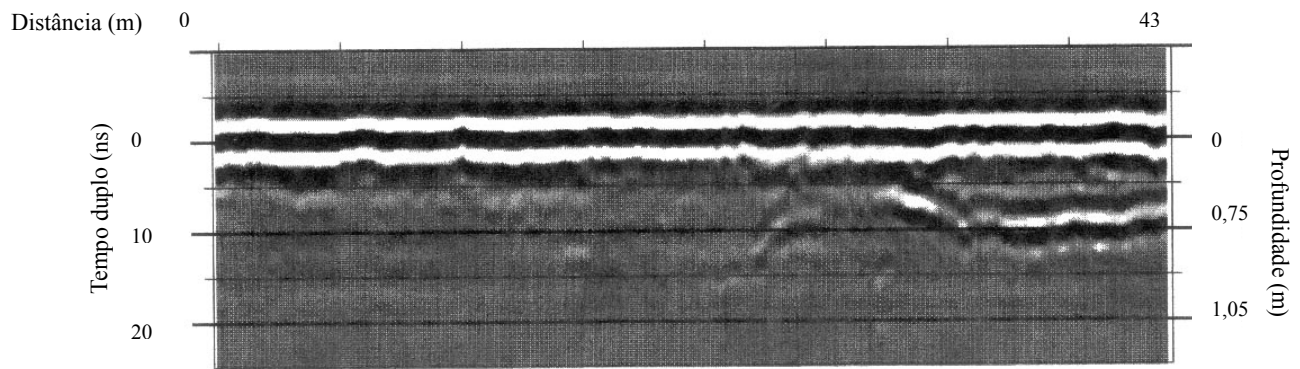
Perfil 35



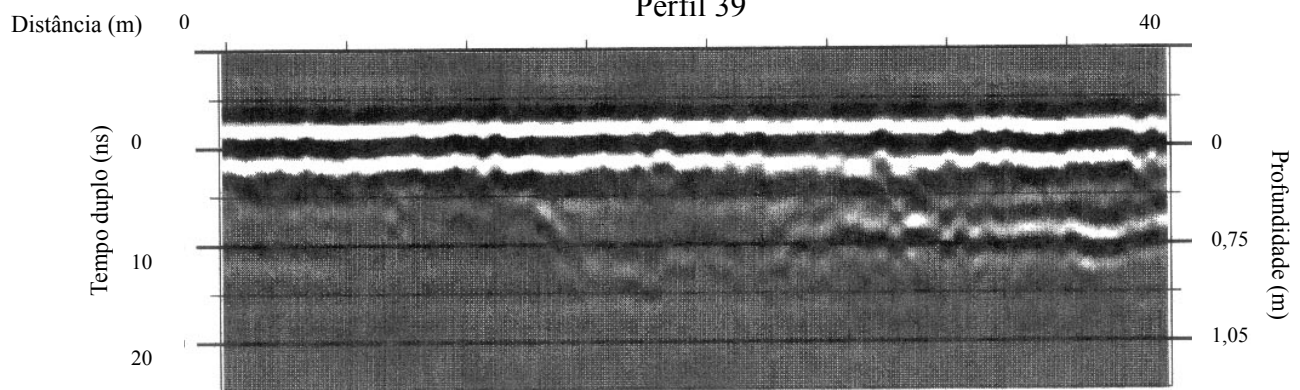
Perfil 36



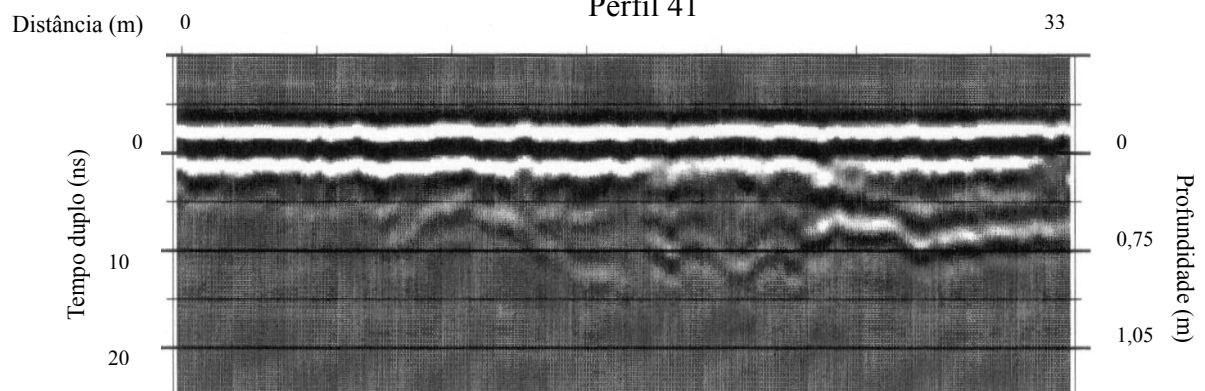
Perfil 37



Perfil 39



Perfil 41



Perfil 43

